

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN

SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN



DE KLEURSCHEIDING IN KLEURENTELEVISIECAMERA'S

door H. de LANG *) en G. BOUWHUIS *).

535.415:621.397.132

De voor kleurentelevisie vereiste splitsing van het licht in een blauwe, een groene en een rode component kan op doeltreffende wijze worden teweeggebracht door middel van kleurselectief reflecterende interferentielagen. De verwerking van zulke lagen in een optisch systeem is op allerlei wijzen mogelijk. De gezichtspunten die daarbij een rol spelen, worden in dit artikel uiteengezet, en er wordt een nieuw kleurscheidend systeem beschreven dat gunstige eigenschappen bezit.

Een kleurentelevisiecamera voor de normale uitzendingen zal een kleurenonderscheidingsvermogen moeten hebben dat adequaat is aan dat van het menselijk oog. Daartoe moet de camera in wezen uit drie camera's zijn opgebouwd, elk met een bepaalde spectrale gevoeligheidsverdeling. Het maximum van de drie vereiste verdelingen ligt resp. in het blauw, het groen en het rood.

We zullen ons in hetgeen volgt uitsluitend bezighouden met het meest toegepaste systeem voor zulk

een camera; hierbij worden drie identieke opneembuizen gebruikt, b.v. vidicons, en er is een optisch gedeelte dat het op te nemen tafereel via drie „kanalen” op de lichtgevoelige lagen der drie buizen afbeeldt. De spectrale doorlatingskrommen der drie optische kanalen moeten de bovenbedoelde vorm hebben. Verder is het noodzakelijk dat het opnamestandpunt voor de blauwe, de groene en de rode afbeelding hetzelfde is; in optische termen: de drie afbeeldingen moeten een gemeenschappelijke intrepupil hebben. Was deze eis niet vervuld, dan zouden parallaxverschijnselen de onderlinge congruentie der drie beelden verstoren.

*) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

Voor de eigenlijke afbeelding gebruikt men objectieven, die qua afbeeldingskwaliteit in principe aan dezelfde eisen moeten voldoen als objectieven voor zwart-witte televisie of fotografie. De kleurscheiding, d.i. de splitsing in de drie optische kanalen, gebeurt door kleurselectieve interferentie-spiegels. Het principe en de vervaardiging hiervan zijn al eens in dit tijdschrift besproken¹⁾.

Mogelijke opstellingen voor afbeelding en kleurscheiding

De volgorde van de beide stappen: afbeelding en kleurscheiding, ligt a priori niet vast. In fig. 1, 2 en 3 zijn enige principiële mogelijkheden weergegeven.

In de opstelling volgens fig. 1 vindt eerst de scheiding plaats. Spiegel S_R splitst van het licht dat van het tafereel komt, het rode gedeelte af, en spiegel S_B vervolgens van de rest het blauwe. Elk der drie opneembuizen heeft zijn eigen objectief. Een nadeel van dit systeem (waarmee enige tijd in dit laboratorium is geëxperimenteerd) is, dat bij verwisseling van objectief voor tele- of groothoekopnamen alle drie objectieven tegelijk moeten worden vervangen. Dit maakt de handhaving der optische en mechanische identiteit van de optische kanalen zeer moeilijk.

In fig. 2 is een opstelling geschetst waarin de drie optische kanalen één gemeenschappelijk objectief hebben. Pas achter dit objectief vindt de kleurscheiding door spiegels S_R en S_B plaats. De objectiefwisseling levert dan geen moeilijkheden op; de optische identiteit der drie kanalen hangt alleen maar van de juiste opstelling van spiegels en opneembuizen af. Een probleem bij deze opstelling is, dat de kleurscheidende spiegels een grote vrije beelddafstand van het objectief nodig maken. Daardoor kan alleen met behulp van bijzondere objectieven, waarvan de vrije beelddafstand aanzienlijk groter is dan de brandpuntsafstand, een redelijke groothoekwerking worden verkregen. De in fig. 2 geschetste opstelling wordt toegepast in de kleurentelevisiecamera voor medisch gebruik die enkele jaren geleden door de N.V. Philips op de markt is gebracht. Een variatie in brandpuntsafstand wordt hier niet verkregen door objectiefwisseling maar door gebruik van een zg. Zoom-lens (d.i. een objectief waarbij door onderlinge verplaatsing van delen een continue regeling van de brandpuntsafstand mogelijk is). Deze Zoom-lens heeft een vrije afstand van 140 mm, terwijl de kortste brandpuntsafstand toch niet meer dan 45 mm bedraagt.

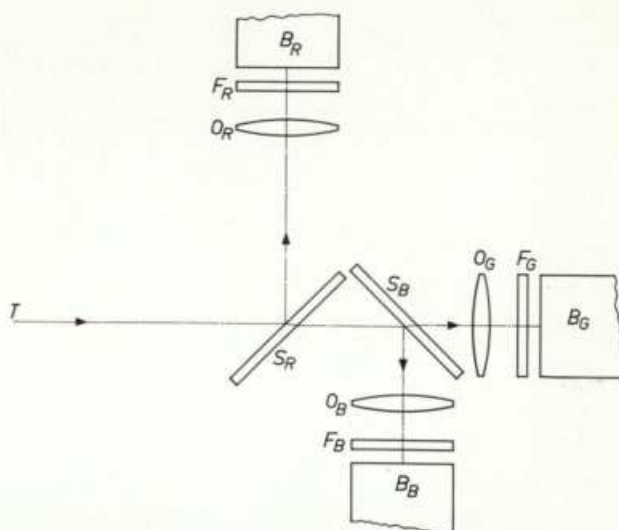


Fig. 1. Opstelling voor een kleurentelevisiecamera waarbij het licht, dat van het op te nemen tafereel T komt, eerst in een rode, een blauwe en een groene component wordt gesplitst door de kleurscheidende spiegels S_R en S_B . Daarna volgt de afbeelding op de drie identieke opneembuizen B_R , B_B en B_G door de objectieven O_R , O_B en O_G . De componenten kunnen desgewenst (zij het met lichtverlies) nog enigszins van verkeerde kleurbestanddelen worden gezuiverd door filters F_R , F_B , F_G .

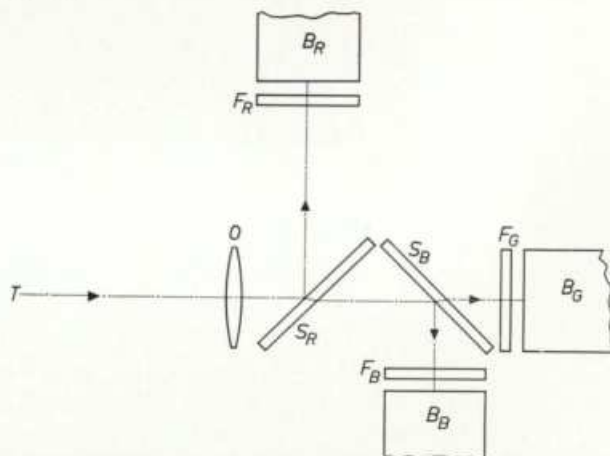


Fig. 2. Opstelling voor een kleurentelevisiecamera waarbij de kleurscheidende spiegels pas na het afbeeldende element (één enkel objectief O) komen. Letters als in fig. 1.

Een laatste mogelijkheid is geschetst in fig. 3. Het objectief O_1 ontwerpt een beeld van het tafereel ter plaatse van een veldlens O_2 . Dit beeld wordt door een herafbeeldingssysteem (een zg. „relay” systeem), bestaande uit twee objectieven O_3 en O_4 , afgebeeld op de groene en — via de spiegel S_B — op de blauwe opneembuis. De rode opneembuis ontvangt zijn beeld op analoge wijze door de objectieven O_3 en O_4 — via de spiegel S_R . Men ziet dat de stappen van afbeelding en kleurscheiding hier enigszins door elkaar lopen. Zulk een opstelling is gerealiseerd in een experimentele camera die in dit laboratorium wordt gebruikt. Om de afbeeldingsfouten van de veldlens te compenseren, hebben we nog correctielenzen O_{5G} , O_{5B} en O_{5R} toegevoegd. Ondanks

¹⁾ P. M. van Alphen, Toepassingen van de interferentie van licht aan dunne laagjes, Philips techn. T. 19, 50-58, 1957.

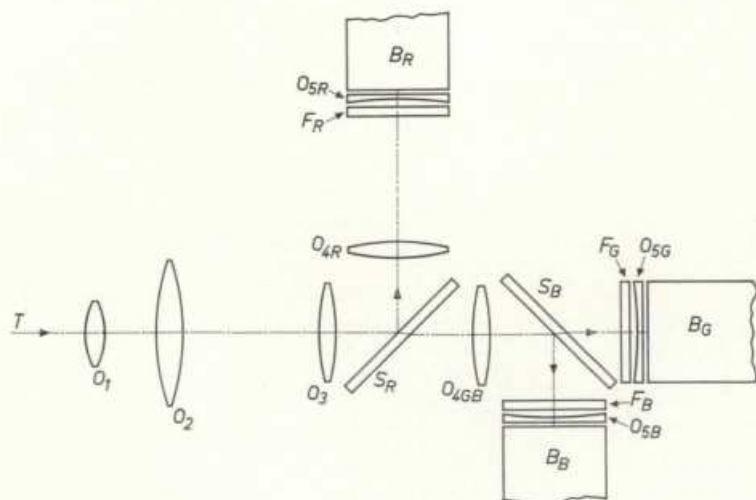


Fig. 3. Opstelling voor een kleurentelevisiecamera waarbij de stappen van afbeelding en kleurscheiding door elkaar lopen. Het objectief O_1 beeldt het taferel op de veldlens O_2 af. Dit beeld wordt door herafbeeldingssysteem O_3 - O_{4R} en O_3 - O_{4GB} afgebeeld op de drie opneembuizen. O_{5R} , O_{5B} en O_{5G} zijn correctielenzen. Overige letters als in fig. 1 en 2.

de enigszins geïmproviseerde optische bouw is de beeldscherpte van deze camera zeer behoorlijk. Bij deze opstelling zijn geen beperkingen opgelegd aan de vrije beeldsafstand der objectieven en men kan derhalve zeer korte effectieve brandpuntsafstanden realiseren: voor de zojuist genoemde camera b.v. tot 25 mm, bij een openingsverhouding 1:2,0 en een beeldformaat van 12×16 mm op de opneembuizen. Een nadeel van de opstelling is, dat het grote aantal grensvlakken tussen glas en lucht (ca. 30) merkbaar verlies aan licht en contrast geeft (doorlating ca. 35%).

We zeiden reeds dat in de door Philips gefabri-

ceerde medische kleurentelevisiecamera een opstelling volgens fig. 2 wordt toegepast. In fig. 4 is de werkelijke plaatsing der onderdelen in deze camera weergegeven. Om de afmetingen van de camera te beperken, was het wenselijk de drie opneembuizen met hun afbuigspoelen ongeveer evenwijdig met elkaar te plaatsen. Te dien einde zijn twee gewone vlakke spiegels s_1 en s_2 toegevoegd. De eis dat geen delen van lichtbundels mogen worden onderschept, belet ons de onderdelen nog dichter bij elkaar op te stellen.

Bij alle hier geschetste methodes van kleurscheiding heeft men te kampen met een aantal bezwaren die vastzitten aan het gebruik van kleurselectieve

interferentiespiegels op plaatvormige dragers. Deze bezwaren willen we in dit artikel bespreken. We hebben ze in aanzienlijke mate kunnen onder-
vangen door ontwikkeling van een nieuw kleurscheidend element, nl. een prismastelsel waarin kleurselectieve spiegelende lagen zijn ingekit. Tot besluit zullen we op de constructie hiervan ingaan.

Bezwaren van de gebruikelijke kleurscheidende spiegels

We sommen de bedoelde bezwaren op en vermelden tevens, waar dit te pas komt, remedies die men heeft weten te bedenken.

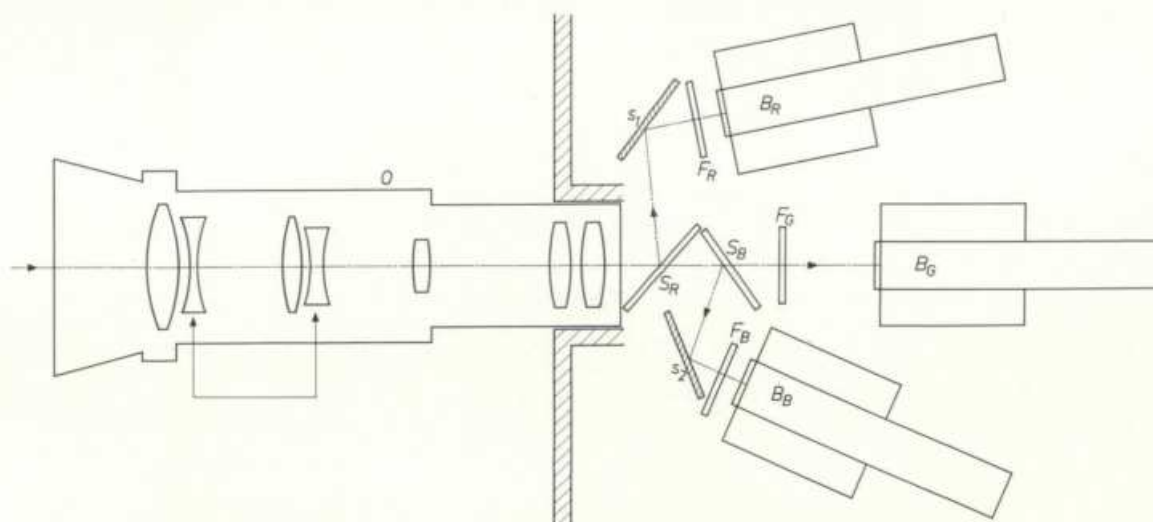


Fig. 4. Opstelling van de onderdelen in de door Philips in de afgelopen jaren gefabriceerde medische kleurentelevisiecamera, schematisch voorgesteld maar enigszins op schaal. De opstelling volgt het systeem van fig. 2. De letters hebben dezelfde betekenis als daar. Als objectief O is een Zoom-lens gebruikt. Daar de kleurscheidende spiegels veel ruimte vragen, moest deze lens een grote vrije beeldsafstand hebben (in casu 140 mm, bij een kortste brandpuntsafstand van 45 mm en een openingsverhouding 1:4,2). Door toevoeging van de gewone vlakke spiegels s_1 en s_2 konden de drie opneembuizen (waarvan hier ook de afbuigspoelen zijn aangeduid) ongeveer evenwijdig worden geplaatst.

- a) De kleurscheidende spiegels vragen, zoals men in fig. 4 ziet, een grote ruimte, waardoor de optische doelmatigheid in het gedrang komt.
- b) De planparallelle glasplaat, waarop de interferentielagen van een spiegel zijn opgedampt, introduceert in het algemeen afbeeldingsfouten in de doorgelaten bundel, en wel astigmatisme en coma. Men kan deze fouten niet tegengaan door er bij het ontwerp der objectieven al rekening mee te houden, want de scheefstaande plaat heeft de omwentelingssymmetrie om de optische as verstoord. Bestrijding der fouten is wel mogelijk met behulp van compenserende optische elementen²⁾, of, op bijzonder effectieve en prettige manier, door de plaat enigszins wigvormig te maken. Astigmatisme en coma kunnen hierdoor gelijktijdig worden opgeheven³⁾. Bij grote openingsverhoudingen echter zijn deze middelen niet toereikend.
- c) De reflexie aan de achterkant van de plaat kan een nevenbeeld geven, dat weliswaar zeer zwak is, maar onder ongunstige omstandigheden storend kan zijn.
- d) De interferentielagen hebben in de praktijk een betrekkelijk grote gevoeligheid voor beschadiging en verwerking. In dit opzicht is een belangrijke verbetering verkregen door het gebruik van hardere en meer resistente lagen, zoals TiO_2 en SiO_2 , in plaats van de tot voor kort gebruikelijke lagen van ZnS en Na_3AlF_6 of MgF_2 .
- e) Een laatste en principiële moeilijkheid wordt veroorzaakt door het feit dat de reflexie-eigenschappen van een interferentiespiegel afhangen van de invalshoek. Vooral bij grote invalshoeken treden daardoor allerlei storende effecten op. In een opstelling als in fig. 4, waarbij de spiegels onder vrij grote hoeken moeten staan met het oog op het niet onderscheppen van bundeldelen (invalshoek van de hoofdstraal resp. ca. 42° en 35°), doen deze effecten zich terdege gevoelen. Daar de verschijnselen nogal ingewikkeld zijn, maar anderzijds fysisch wel interessant, willen wij er een afzonderlijk hoofdstukje aan wijden.

Afhankelijkheid der reflexie-eigenschappen van de invalshoek

Zoals in het aangehaalde artikel¹⁾ is uiteengezet, is de effectieve optische dikte van een laagje ter dikte d voor een invallende straal gelijk aan $nd \cos \varphi$, waarbij n de brekingsindex van het laagje voorstelt en φ de hoek die de straal in het laagje insluit

²⁾ L. T. Saatchleben, D. J. Parker, G. L. Allee en E. Kornstein, RCA Rev. **13**, 27, 1952.

³⁾ B. Cuny, Revue d'Optique **34**, 460, 1955.
H. de Lang, Philips Res. Repts. **12**, 181, 1957.

met de normaal. Hierdoor zullen bij toenemende invalshoek φ de reflexie- en transmissiekrommen van de spiegel naar kleinere golflengten verschuiven. Men geeft de ligging van deze krommen gewoonlijk aan door de golflengte $\lambda_{50/50}$ waarbij reflexie en doorgelating ieder 50% bedragen. Het bovenstaande betekent dus dat $\lambda_{50/50}$ met toenemende invalshoek afneemt.

De gevolgen van deze verschuiving kunnen we toelichten aan de hand van fig. 5. De beide stralen p en q , die van verschillende punten van het op te nemen tafereel afkomstig zijn, lopen door het centrum van het objectief O naar verschillende punten P en Q van de lichtgevoelige laag van de opneembuis. Deze stralen hebben op de kleurscheidende spiegel S verschillende invalshoeken gehad, zodat de kleurweergave voor de punten P en Q verschillend wordt; met andere woorden: het verloop in invalshoek geeft aanleiding tot kleurverloop over het beeld.

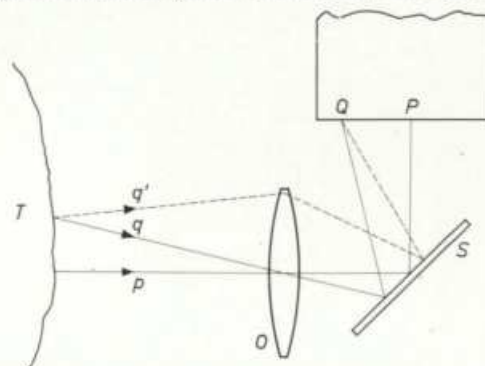


Fig. 5. Stralen p en q vanuit twee punten van het tafereel T vallen onder verschillende hoeken op de kleurselectieve spiegel S . Aangezien de spectrale reflexiekromme afhangt van deze invalshoek, krijgt men verschillende kleurweergave in de punten P en Q van het beeld (kleurverloop over het beeld).

Stralen q en q' vanuit één zelfde punt van het tafereel vallen in het algemeen eveneens onder verschillende hoeken op de spiegel. Voor hun lichtbijdragen tot het ene beeldpunt Q geldt derhalve een enigszins verschillende spectrale reflexiekromme, het resultaat is een minder scherpe kleurscheiding.

Beschouwen we vervolgens de stralen q en q' , die van een zelfde punt van het tafereel afkomstig zijn doch die gaan door verschillende punten van de intrepupil. Ook deze stralen hebben op de spiegel S een verschillende invalshoek, maar zij verenigen zich in een zelfde punt Q van de lichtgevoelige laag. Het effect is dat voor de kleurweergave in dit punt gerekend moet worden met een reflexiekromme die het gemiddelde is van twee, of in het algemeen van een hele reeks, ten opzichte van elkaar verschoven, spectrale reflexiekrommen, waardoor een scherpe kleurscheiding moeilijk wordt. Vooral bij zeer lichtsterke objectieven kan dit effect storend worden, maar ook bij meer normale openingsverhoudingen is het al goed merkbaar. In de camera volgens fig. 4, met openingsverhouding 1:4,2, be-

draagt de variatie in invalshoek voor het centrum van het beeld ca. 7° naar weerszijden van de hoofdstraal.

Beide effecten — het kleurverloop over het beeld en het middelen van een reeks reflexiekrommen voor een beeldpunt — kunnen worden bestreden door de laagdikte over de spiegel te doen verlopen. Een prettige methode is dit echter niet, en — wat erger is — het vereiste verloop in laagdikte is in het algemeen voor de twee effecten niet hetzelfde. In eenvoudige gevallen zoals in fig. 5 zou het verloop van de laagdikte voor het ene effect zelfs een tegengesteld teken moeten hebben als voor het andere effect. Compenseert men dus voor het eerste effect — dat in het algemeen het schadelijkst is —, dan moet men een nog ergere vervaging van de kleurscheiding op de koop toe nemen.

Behalve de variatie van de effectieve optische laagdikte met de invalshoek is er nog een ander storend effect, verband houdend met polarisatieverschijnselen, die bij scheve inval optreden. Bij toenemende invalshoek wordt de reflexiecoëfficiënt voor licht met loodrecht op het invalsvlak trillende elektrische vector groter, die voor licht met evenwijdig aan dat vlak trillende vector kleiner. De reflexiecoëfficiënt voor de „loodrechte component” van natuurlijk licht is dus bij scheve inval groter dan die voor de „evenwijdige component”⁴⁾. In fig. 6 zijn de beide spectrale reflexiekrommen (de beide zg. spiegelkarakteristieken) voor een bepaald geval uitgezet. In de praktijk zal voor ongepolariseerd licht dat van het tafereel in de camera komt, het gemiddelde der beide spiegelkarakteristieken gelden.

Is echter het licht dat van het tafereel komt, reeds gepolariseerd (zoals licht, gereflecteerd aan spiegelende voorwerpen, b.v. wateroppervlakken of transpirerende hoofden van acteurs!), dan kunnen kleurverschuivingen optreden, daar de reflexiekromme van de interferentiespiegel afhankelijk is van de oriëntatie van het polarisatievlak.

Evenals in het vorige hoofdstuk, vermelden we hier enkele mogelijkheden om de ongewenste effecten te bestrijden.

De kleurverschuiving ten gevolge van polarisatie-effecten kan men elimineren door aanbrengen van een $\frac{1}{4}\lambda$ -plaat in diagonaalstand vóór het kleurscheidingsysteem. Men kan aantonen dat de loodrechte en de parallelle component waarin men het uit deze

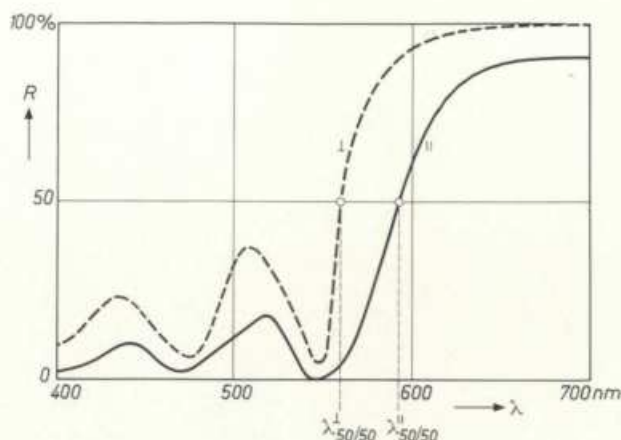


Fig. 6. Reflexiecoëfficiënt R van een rood reflecterende spiegel (7 lagen van afwisselend ZnS en Na_3AlF_6 op glazen plaat), bij een invalshoek van 42° , als functie van de golflengte λ , voor gepolariseerd licht, nl. resp. de „loodrechte component” en de „evenwijdige component”. De golflengte $\lambda_{50/50}$ is voor de eerste aanmerkelijk kleiner dan voor de laatste.

plaat tredende licht kan ontbinden, steeds even sterk zijn. Men krijgt dus, ongeacht de oorspronkelijke polarisatierichting, altijd een effectieve spectrale reflexiekromme die het gemiddelde is van die voor loodrecht en die voor parallel gepolariseerd licht. Weliswaar krijgt men bij dit uitmiddelen bij grote invalshoeken ten volle het nadelige effect van de „slechte” spiegelkarakteristiek voor de parallelle component te voelen — maar dat was bij ongepolariseerd licht natuurlijk evenzeer het geval geweest. Dit nadelige effect is alleen te bestrijden door de invalshoeken zelf zo klein mogelijk te houden — en inderdaad is dit de principieel juiste weg, tegelijk voor het tegengaan van de boven beschreven bezwaren die eraan te wijten zijn dat de effectieve optische laagdikte afhangt van de invalshoek. We hebben echter reeds bij de bespreking van fig. 4 gezien dat de plaatsing der diverse onderdelen in de camera een noemenswaardige verdere verkleining van de invalshoeken (minder scheve stand der interferentiespiegels) niet toelaat.

Een elegant middel dat men hier in de hand heeft om toch nog iets te winnen, bestaat daarin, de sterk brekende lagen van de interferentiespiegel een dikte te geven van $\frac{3}{4}\lambda$ (of eventueel zelfs $\frac{5}{4}\lambda$, enz.), terwijl die van de zwak brekende lagen als voorheen $\frac{1}{4}\lambda$ blijft. Hierdoor wordt de effectieve laagdikte in mindere mate afhankelijk van de invalshoek. Men kan dit globaal inzien door te bedenken dat bij zo’n $\frac{3}{4}\lambda$ -spiegel het licht het grootste gedeelte van zijn weg aflegt in een sterk brekend medium, waar de hoek van de stralen met de normaal kleiner is dan in een zwak brekend medium. Het gunstiger gedrag van $\frac{3}{4}\lambda$ -spiegels wordt gedemonstreerd door fig. 7.

Bij het gebruik van deze $\frac{3}{4}\lambda$ -spiegels moet men

⁴⁾ Valt het licht in onder de hoek van Brewster, dan is de reflexiecoëfficiënt voor de evenwijdige component zelfs nagenoeg nul, dus de doorlating vrijwel 100%. Op deze wijze kan men met behulp van een interferentiespiegel een lichtbundel zeer effectief in twee bundels met onderling loodrechte trillingsrichtingen ontbinden.

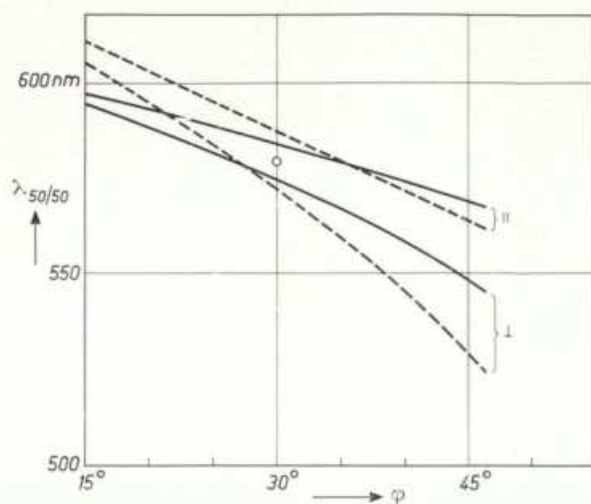


Fig. 7. De kleurscheiding als functie van de invalshoek φ , voor twee soortgelijke spiegels als in fig. 6, beide gemaakt voor $\lambda_{50/50} = 580$ nm bij een invalshoek van 30° . Bij de eerste spiegel (gestippeld) zijn de sterk brekende en de zwak brekende laagjes beide $\frac{1}{4}\lambda$ dik, bij de tweede spiegel (getrokken) zijn de sterk brekende laagjes $\frac{1}{4}\lambda$ dik. Uitgezet is $\lambda_{50/50}$ als functie van de invalshoek, en wel afzonderlijk voor de loodrecht en de evenwijdig gepolariseerde component. Voor on gepolariseerd licht geldt het gemiddelde van de twee krommen. Men ziet dat $\lambda_{50/50}$ voor de $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{4}$ - λ -spiegel aanzienlijk minder met de invalshoek varieert en voor loodrechte en evenwijdige component aanzienlijk minder verschilt.

er wel rekening mee houden dat de rood reflecterende spiegel ook nog een reflexie in het blauw vertoont. Het is dus nodig de opstelling zo te kiezen dat eerst door de blauw reflecterende spiegel het blauwe gedeelte van het aankomende licht wordt afgesplitst. Valt daarna het resterende licht op de rood reflecterende spiegel, dan heeft diens parasitaire blauwreflexie geen invloed meer.

Kleurscheiding met behulp van een prismastelsel

De hierboven opgesomde bezwaren worden alle hetzij opgeheven hetzij toch in belangrijke mate verminderd door een nieuw kleurscheidingssysteem, dat in dit laboratorium is ontwikkeld en waarvan het principe is geschetst in fig. 8. De kleurselectief spiegelende lagen S_B en S_R zijn hier ingekit tussen de delen van een prismastelsel. Het binnenvallende licht passeert het, door een dunne luchtlaag afgescheiden, vlak 1 en valt op de blauw reflecterende spiegel S_B . Het hier teruggekaatste blauwe gedeelte van het licht wordt vervolgens via totale reflexie aan vlak 1 naar buiten geworpen. Het niet teruggekaatste gedeelte van het licht passeert het, wederom door een dunne luchtlaag afgescheiden, vlak 2 en valt op de rood reflecterende spiegel S_R . Het hier weerkaatste rode licht kan via totale reflexie aan 2 naar buiten treden. Het groene gedeelte van het binnengekomen licht wordt door alle genoemde vlakken en spiegels doorgelaten.

Voor alle drie kleuren is de optische werking van dit prismastelsel equivalent met die van een dikke

planparallelle plaat die loodrecht is geplaatst op de optische as. De afbeeldingsfouten door scheefstaande glazen dragers, waarvoor bij grote openingsverhoudingen geen afdoende remedie bestaat, zijn hiermee geëlimineerd. De scheve planparallelle luchtlagen in het prismastelsel zijn zo dun (van de orde van 0,1 mm) dat ze geen fouten van betekenis veroorzaken. Voorts is het evident dat de ingekitte spiegelende lagen gevrijwaard zijn voor verwerking en beschadiging, ook voor neerslag van stof. Ook heeft men, bij geschikte voorzorgen, geen last van nevenbeelden door valse reflexie. Belangrijk is verder de grote compactheid van de opstelling die men nu voor de camera krijgt en die door fig. 9 wordt geïllustreerd. De totaal reflecterende vlakken 1 en 2 hebben, zoals men bij vergelijking met fig. 4 ziet, de functie van de aldaar gebruikte spiegels s_1 en s_2 overgenomen, deze zijn als het ware in het prisma ingebouwd terwijl ze toch het binnenvallende licht niet onderscheppen. Door deze compactheid worden de eisen die men aan de vrije beeldafstand van het objectief moet stellen, veel milder (zie hieronder). Als zeer belangrijk voordeel noemen we ten slotte dat bij deze constructie kleinere invalshoeken mogelijk zijn dan voorheen. In fig. 8 zijn beide invalshoeken van de hoofdstraal (op S_B en S_R) niet groter dan 20° . Weliswaar mag men deze waarde niet zomaar vergelijken met de boven vermelde waarden van resp. 42° en 35°

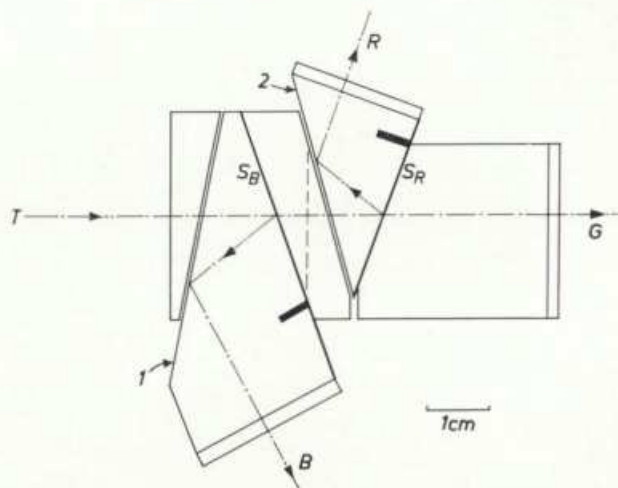


Fig. 8. Kleurscheidend prismastelsel van glas, schematisch. De kleurselectief spiegelende lagen S_B en S_R zijn ingekit tussen de delen van het stelsel. Bij de vlakken 1 en 2 is het glas door dunne luchtlagen onderbroken. Het door S_B gereflecteerde blauwe gedeelte B van het binnentredende licht wordt via totale reflexie aan vlak 1 naar buiten geworpen. Het door S_R gereflecteerde rode gedeelte R treedt via totale reflexie aan vlak 2 naar buiten. Het groene gedeelte G gaat rechtdoor. De invalshoeken der hoofdstralen op S_B en S_R zijn ieder 20° . Voor elk der drie gedeelten van het binnentredende licht draagt het gehele stelsel zich als een planparallelle glazen plaat die loodrecht op de optische as is geplaatst.

Bij het uittreden passeert elk gedeelte nog een opgekit filter, dat een analoge rol vervult als de filters in fig. 1 enz.

van de invalshoek in lucht, bij gebruik van kleurscheidende lagen op platen: bij de ingekitte lagen hebben we te maken met een invalshoek in glas, en deze komt volgens de brekingswet overeen met een invalshoek in lucht waarvan de sinus n maal zo groot is (n = brekingsindex van het glas). Maar de

winst is toch nog aanzienlijk: voor $n = 1,52$ vinden wij dat een invalshoek van 20° in glas overeenkomt met een invalshoek van 31° in lucht.

De dank zij de kleinere invalshoeken verkregen verbetering in de kleurscheiding wordt gedemonstreerd door fig. 10. Hierin is het verloop van het

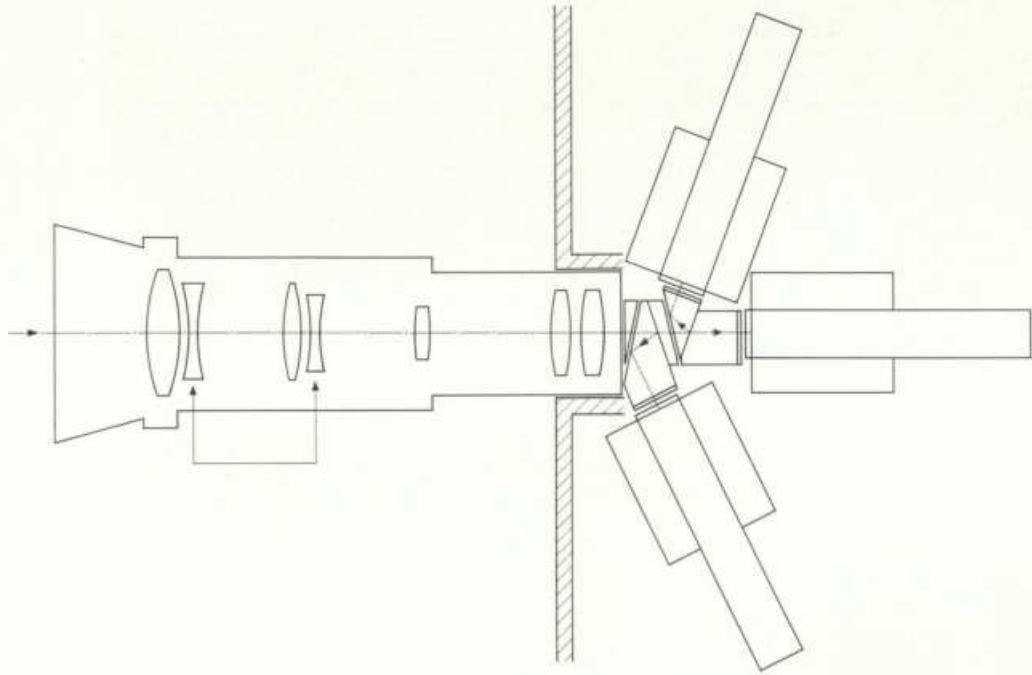


Fig. 9. Opstelling van de onderdelen in een kleurentelevisie-camera analoog met fig. 4, maar bij gebruik van een prismastelsel volgens fig. 8 voor de kleurscheiding. De opstelling is veel compacter geworden, men komt met een kleinere vrije beelds-afstand van het objectief toe en de kleurscheiding is beter, doordat het licht onder kleinere invalshoeken wordt gereflec-teerd.

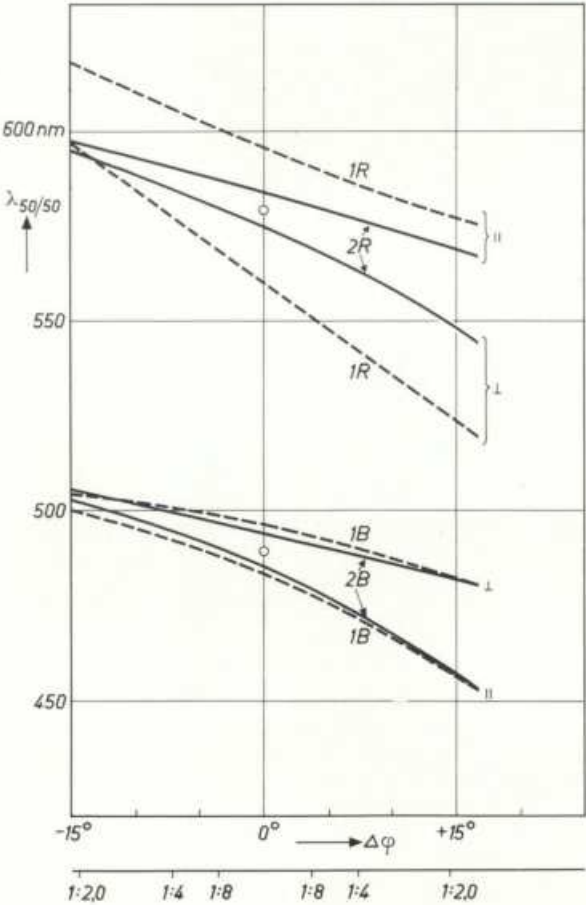


Fig. 10. Kleurscheiding als functie van de invalshoek, uitgezet op dezelfde wijze als in fig. 7, voor twee kleurscheidingssyste-men. De krommen 1R en 1B gelden voor het systeem volgens fig. 4, met rood reflecterende $\frac{1}{4}\lambda$ - en blauw reflecterende $\frac{3}{4}\lambda$ -interferentielagen. De krommen 2R en 2B gelden voor het prismastelsel volgens fig. 8, waarbij $\frac{3}{4}\lambda$ -interferentie-lagen zowel voor de roodreflexie als voor de blauwreflexie zijn gebruikt.

Als abscis is hier uitgezet het hoekverschil $\Delta\varphi$ (omgerekend op lucht) ten opzichte van de hoofdstraal. De invalshoek van de hoofdstraal zelf is immers voor elk der beschouwde spiegels verschillend — daaraan is juist het gunstiger gedrag van de spiegels in het prismastelsel te danken. De waarden van deze invalshoek zijn in het onderstaande tabelletje samengevat.

Voor elk hoekverschil $\Delta\varphi$ kan men opgeven, bij welke openingsverhouding van het objectief hoekverschillen tot maxi-maal die waarde optreden. Langs de abscis is ook de aldus toegevoegde openingsverhouding uitgezet.

	Lagen op plaat		Lagen in prisma	
	1R	1B	2R	2B
Invalshoek van hoofdstraal	42°	35°	20°	20°
	in lucht		in glas	
Gebruikte inter-ferentielagen	$\frac{1}{4}\lambda$	$\frac{3}{4}\lambda$	$\frac{3}{4}\lambda$	$\frac{3}{4}\lambda$

eerder vermelde $\lambda_{50/50}$ -punt met de invalshoek weergegeven voor de beide spiegels van het systeem van fig. 4 (krommen $1R$ en $1B$) en voor die van het prismastelsel (krommen $2R$ en $2B$).

Voor de praktische uitvoering zijn nog allerlei varianten van het in fig. 8 geschetste principe mogelijk. De in fig. 11 perspectivisch getekende vorm sluit nauw bij fig. 8 aan. Men kan ze hieruit ontstaan denken door het achterste gedeelte (rechts van de streeplijn) over 90° om de optische as te draaien.

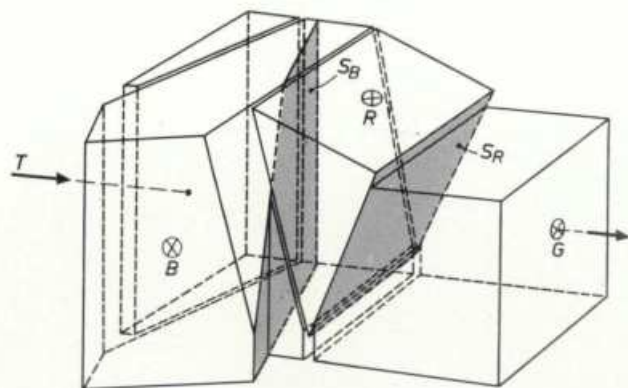


Fig. 11. Werkelijke uitvoering van het in fig. 8 in principe geschetste prismastelsel. Op de geschaduwde vlakken bevinden zich de interferentielagen. Het achterste gedeelte van het stelsel, rechts van de streeplijn in fig. 8, is ten opzichte van de daar getekende stand 90° om de as (hoofdstraal G) gedraaid. Ter verduidelijking is het uittreepunt van elk der hoofdstralen B , R , G aangegeven.

Hierdoor wordt een prettige opstelling van de opneembuizen in de camera verkregen (niet in één vlak als in fig. 9). Het aldus geconstrueerde prismastelsel is geschikt voor een objectief met een openingsverhouding $1:2,0$ en een beeldformaat van 9×12 mm. De glaslengte (afstand door het licht in glas afgelegd) bedraagt 63 mm, het objectief moet, wat betreft correctie, hierbij zijn aangepast. Voor de door deze glaslengte gegeven vrije beelds-afstand is een Zoom-lens beschikbaar waarvan de kortste brandpuntsafstand slechts 25 mm bedraagt. Het gekozen lenstype blijkt het bijkomende voordeel te hebben dat de uittreepupil nagenoeg in het oneindige ligt. Daardoor is het kleurverloop over het beeldvlak, dat hierboven aan de hand van fig. 5 is besproken, zeer gering.

Een prototype van het beschreven prismastelsel is in dit laboratorium vervaardigd met medewerking van de Hoofdindustriegroep Glas, ten behoeve van de Hoofdindustriegroep Elektroakoestiek (die de camera's fabriceert). Met dit prototype is de titelfoto gemaakt.

Bij een fabriekmatige constructie van de camera wordt voor de plaatsing der opneembuizen niet

veel speling gelaten, zodat de drie beelden die via het prismastelsel worden ontworpen, vrij nauwkeurig moeten zijn gelokaliseerd. Hiertoe is een vrij precieze vormgeving van elk der elementen van het prismastelsel nodig en een overeenkomstige nauwkeurigheid bij het samenkitten. De dunne luchtlagen mogen natuurlijk niet met kit opgevuld worden, met het oog op de totale reflexie. Om binnendringen van stof te voorkomen, zijn ze aan de rand voorzien van een luchtdichte kitstrook.

Een andere uitvoeringsvorm van het prismastelsel is in fig. 12 geschetst. Terwijl voor het stelsel in fig. 8 en 11 ervan uitgegaan was dat de invalshoeken van de hoofdstralen op beide kleurscheidende spiegels even groot moesten worden, is voor het stelsel in fig. 12 hiervan afgestapt. De overweging hierbij is, dat de kleurscheiding rood-groen belangrijker is dan de scheiding groen-blauw. In het bijzonder is dit het geval voor het weergeven van de kleur van de menselijke huid. De invalshoek op de rood reflecterende spiegel is daarom voor dit stelsel teruggebracht van 20° tot 13° (equivalente hoek in lucht $\varphi_1 = 20^\circ$); voor de invalshoek op de blauw reflecterende spiegel moet dan met een grotere waarde genoeg worden genomen, nl. $25,5^\circ$ ($\varphi_1 = 41^\circ$). Door de andere keuze der hoeken kan het prismastelsel nog iets vereenvoudigd worden ten opzichte van fig. 8: vlak 1 kan samenvallen met het intreevlak, de luchtlaag voor vlak 2 met de achterkant van S_B . Het geheel kan daardoor uit slechts drie delen worden samengesteld. Een draaiing van een gedeelte om de optische as,

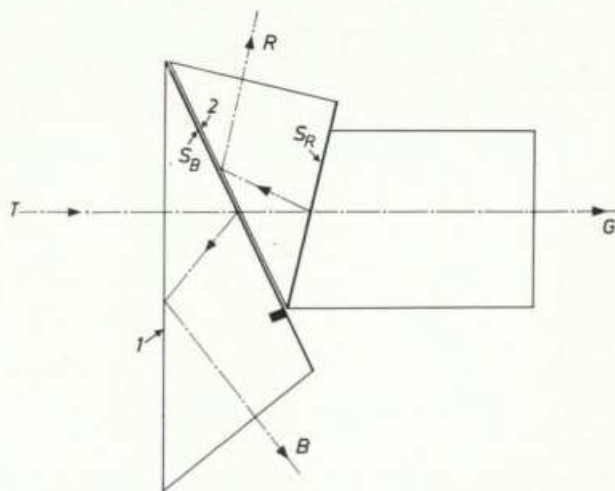


Fig. 12. Een andere uitvoering van het prismastelsel. De invalshoek van de hoofdstraal op S_R is hier zo klein mogelijk gekozen, nl. 13° , voor een zo goed mogelijke scheiding van rood en groen, ten koste van een grotere invalshoek op S_B ($25,5^\circ$). De constructie van het stelsel kan hier nog iets worden vereenvoudigd ten opzichte van die in fig. 8: het bestaat nu uit slechts drie delen.

zoals in fig. 11, is nu echter niet mogelijk, zodat men tot een minder compacte bouw van de camera komt.

Samenvatting. Voor kleurentelevisie moet het licht dat van een op te nemen tafereel komt, worden gesplitst in een blauwe, een groene en een rode component. De meeste kleurentelevisie-camera's, o.a. ook de door de N.V. Philips in de afgelopen jaren gefabriceerde, bevatten hiertoe een systeem van kleurscheidende spiegels, bestaande uit interferentiële lagen op plaatvormige dragers. Aan deze uitvoering van het kleurscheidende systeem zitten een aantal bezwaren vast: de spiegels vragen

betrekkelijk veel ruimte, het te gebruiken camera-objectief moet een grote vrije beeldsafstand bezitten, de plaatvormige dragers veroorzaken beeldfouten, de spiegels staan bloot aan beschadiging, en men heeft te maken met grote invalshoeken. Dit laatste bezwaar wordt in dit artikel uitvoerig toegelicht; het leidt tot kleurverloop over het beeld, tot gebrekkige kleurscheiding, en tot kleurafwijkingen bij gepolariseerd licht.

Al deze bezwaren worden opgeheven of aanzienlijk vermindert door een nieuw ontwikkeld systeem, waarbij de kleurselectief reflecterende interferentiële lagen zijn ingekit in een prismastelsel. Enige uitvoeringsvormen hiervan worden beschreven. De effectieve invalshoeken zijn hierbij van 42° en 35° teruggebracht tot resp. 31° en 31° (of tot 20° en 41°). Een grafiek illustreert de bereikte verbetering in de kleurscheiding.

DE AMPLISCOOP, EEN EXPERIMENTEEL TOESTEL VOOR HET HARMONISEREN VAN RÖNTGENBEELDEN

door E. ZIELER *) en K. WESTERKOWSKY *).

621.397.33

Ten einde de informatie die een röntgenfoto bevat zo volledig mogelijk of zo gemakkelijk mogelijk eruit te kunnen halen, heeft men nieuwe methodes voor het bekijken ervan ontwikkeld, waarbij elektronische hulpmiddelen worden gebruikt. In de Ampliscoop wordt een röntgenfoto bekeken met behulp van twee televisiecamera's, waarvan de signalen op bepaalde wijze worden gemengd.

De röntgendiagnostiek berust op het feit dat plaatselijke verschillen in dikte en chemische samenstelling van de objecten in het menselijk lichaam een plaatselijk verschillende verzwakking van de doorgaande röntgenstraling tot gevolg hebben. Dit „röntgencontrast” wordt bij het maken van een röntgenfoto vertaald in plaatselijke zwartingsverschillen op basis van de zwartingskromme van het fotografische materiaal (fig. 1).

De diagnostisch belangrijke anatomische afwijkingen zijn vaak slechts klein en veroorzaken slechts een gering röntgencontrast. Om de waarneming van zulke kleine afwijkingen te vergemakkelijken, ligt het voor de hand voor de opname een fotografisch materiaal met zeer steile zwartingskromme (grote gamma) te gebruiken. In de praktijk echter is dit vaak niet mogelijk, doordat de grove structuur, die in het onderzochte lichaamsdeel aanwezig is, zelf reeds grote zwartingsverschillen veroorzaakt, waarop de diagnostisch belangrijke detailverschillen zijn gesuperponeerd: ligt de zwarting waartegen een detail moet afsteken, op de bovenste of onderste vlakke uitloper van de zwartingskromme in fig. 1, dan wordt het detailverschil zelfs verzwakt in plaats van versterkt. Om bruikbare resultaten te krijgen, is het dus gewenst tegelijk met het verster-

ken van de detailcontrasten een vereffening van de grove contrasten teweeg te brengen. Deze vereffening noemt men de „harmonisering” van de röntgenfoto.

Ook als het de normale waarneming van voldoende contrastrijke details in het gebied van de gemiddelde

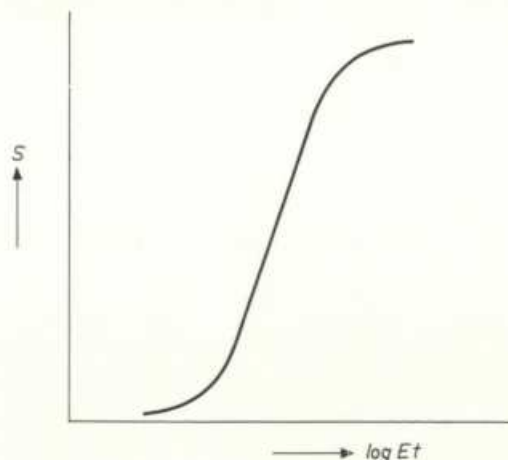


Fig. 1. Zwartingskromme van een fotografische emulsie. Als functie van de logaritmisches uitgezette belichting $E \times t$ is uitgezet de hierdoor verkregen zwarting $S = \log I_0/I_1$ (waarbij I_0 de bij de waarneming op het negatief vallende en I_1 de doorge laten hoeveelheid licht aanduiden). Bij kopiëren is de abscis, op een constante na, gelijk aan de negatieve zwarting van het negatief, de ordinaat de verkregen zwarting van de positieve afdruk. Een helling $a = 45^\circ$ van het rechte gedeelte (een gamma = 1) betekent een getrouwe weergave van de helderheidswaarden in het origineel; een steiler verloop betekent een contrastversterking.

*) C. H. F. Müller GmbH, Hamburg.

zwarting betreft, kan een harmonisering nuttig zijn. Heeft men nl. op naburige plaatsen in de röntgenfoto geringe zwartingen, dan kunnen deze bij de waarneming een overstraling veroorzaken. Men zou dan wederom deze grove contrasten willen vereffen, zonder echter het detailcontrast te verminderen.

Voor dit doel (en voor analoge doelen op andere gebieden dan de röntgendiagnostiek) heeft men verscheidene methodes voorgesteld. In dit artikel willen we een methode beschrijven die in de röntgenfabriek C. H. F. Müller te Hamburg is ontwikkeld en waarvan het principe reeds in 1959 op het 9de Internationale congres voor radiologie te München is gedemonstreerd. Inmiddels is het desbetreffende toestel, hoewel het nog steeds in het experimentele stadium verkeert, verder ontwikkeld en heeft de praktische beproeving van de methode goede resultaten geleverd, zodat ons een nadere beschrijving van het toestel dienstig lijkt. We duiden het gemakshalve aan met de naam die het in het laboratorium gekregen heeft: de Ampliscoop.

De methode berust op het gebruik van hulpmiddelen uit de televisietechniek. Voor we hierop nader ingaan, is het gewenst enkele tot dusver bekende harmoniseringsmethodes te beschouwen, met name twee methodes die geharmoniseerde fotografische afdrukken van de gegeven röntgenfoto leveren. Bij onze methode is dat in eerste instantie niet het geval: ze geeft van de te bekijken röntgenfoto een geharmoniseerd visueel beeld op een fluorescentiescherm. Desgewenst kan men natuurlijk het schermbeeld weer fotografisch vastleggen.

Vroegere harmoniseringsmethodes

Reeds in 1930 heeft Spiegler een methode voor het vervaardigen van geharmoniseerde afdrukken voorgesteld¹⁾. Volgens deze methode wordt van een negatief eerst een onscherp diapositief gemaakt. Vervolgens legt men het diapositief op het negatief en maakt van deze combinatie op normale wijze een contactafdruk. Men ziet in fig. 2 dat de grove structuur van het object nu in het geheel geen zwartingsverschillen in de afdruk achterlaat: alleen de grenzen in deze structuur worden zichtbaar. Daarentegen worden details met afmetingen kleiner dan de onscherpte van het diapositief ten volle weergegeven, met praktisch onveranderd contrast. Het procédé kan bij juiste afstemming van de zwartingskromme van de verschillende fotografische emulsies goede resultaten in de geest als bovenbedoeld geven, is echter nogal omslachtig, zodat het geen ingang gevonden heeft.

¹⁾ G. Spiegler en Kalman Juris, Fortschr. Röntgenstr. 42, 509, 1930.

In de laatste jaren heeft men fotografische harmoniseringsmethodes bedacht waarbij het niet nodig is eerst een onscherp diapositief te maken. Er wordt dan als lichtbron voor het maken van de afdruk een fluorescentiescherm gebruikt dat door een gelijkmatige ultraviolette bestraling tot lichten is gebracht, waarvan echter de plaatselijke helderheidsverdeling beïnvloed wordt door een infrarode bestraling (doving door het effect van Herschel), die op zijn beurt afhangt van de zwartingsverschillen in het origineel²⁾.

Een kopieermethode die met elektronische hulpmiddelen werkt, heeft onder de naam „LogEtron” enige verspreiding in de röntgenologie en nog meer op het gebied van de cartografie verkregen³⁾: bij luchtopnamen heeft men nl. met geheel analoge problemen te maken als in de röntgenografie. Bij deze methode wordt van het negatief een contactafdruk vervaardigd door dit punt voor punt te belichten met de uit de televisietechniek bekende lichtstipafaster⁴⁾; zie fig. 3. De lichtsterkte van de lichtstip wordt echter gedurende de aftasting bestuurd door een fotocel, die de lichtbundel na het passeren van het negatief en het positiefmateriaal opvangt. De besturing werkt zodanig dat bij het aftasten van een goed doorlatend gedeelte van

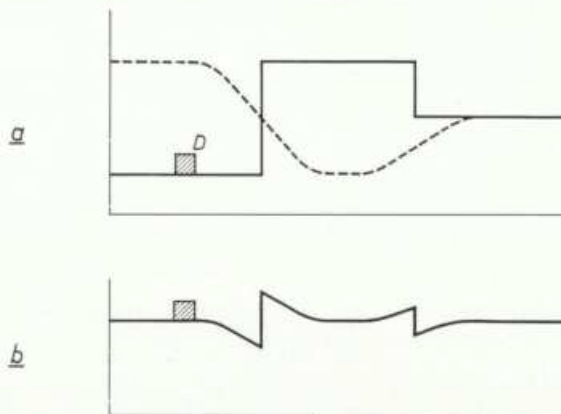


Fig. 2. Ter verklaring van de kopieermethode van Spiegler
a) Over een lijn dwars door het beeld is de plaatselijk variërende zwarting van het te kopiëren originele negatief uitgezet (getrokken lijn). D is een klein detail met gering contrast. Verder ziet men aanzienlijke grove contrasten. De gestippelde lijn geeft het verloop van de zwarting in het onscherpe diapositief, dat men zo goed mogelijk met het negatief tot dekking brengt.
b) Verloop van de zwarting in de verkregen afdruk. De grove contrasten zijn, afgezien van de overgangen van de gebieden, vereffend, het detailcontrast van D is nagenoeg bewaard gebleven.

²⁾ United States Radium Corporation (Genève), Nederlands octrooi no. 99457. Een soortgelijke methode beschrijft: B. M. Woldringh, Harmonisation mittels Phosphorographie, 9de Internationaal congres voor radiologie, München 1959, blz. 1484.

³⁾ D. R. Craig, The LogEtron: a fully automatic, servo-controlled scanning light source for printing, Phot. Engng. 5, 219-226, 1954.

⁴⁾ Zie b.v. F. H. J. van der Poel en J. J. P. Valetton, De lichtstipafaster, Philips techn. T. 15, 217-228, 1953.

het negatief de verlichtingssterkte wordt vermindert, en omgekeerd. De methode lijkt enigszins op de automatische sterkteregeling in radio-ontvangers, en evenals daar kan men in principe (dank zij de traagheidsloosheid van de besturing) de regeling zo uitvoeren dat de „modulatie” in het beeld of in het geluid geheel wordt weggeregeld. Dit is natuurlijk niet de bedoeling, men wil de modulatie

van het beeld ontstaat immers een doorlopend elektrisch signaal (het beeldsignaal), waaruit men met behulp van een eenvoudig integratienetwerk de gemiddelde waarde over een zekere tijd, d.w.z. over een zekere fractie van de lijnlengte, kan produceren. Door middel van een geschikte tegenkoppeling kan men deze gemiddelde waarde de momentele gevoeligheid dusdanig laten besturen dat

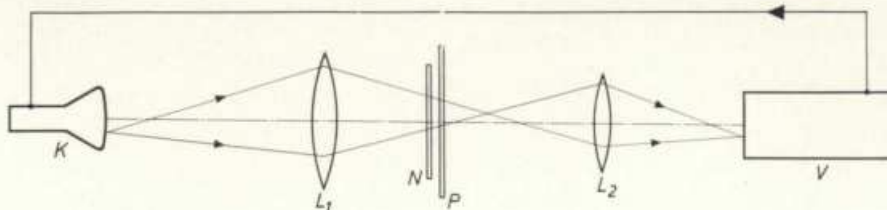


Fig. 3. Principe van de „LogEtron”-methode ³⁾ ter vervaardiging van een geharmoniseerde fotografische afdruk van het negatief N. K lichtstipafstapbuis, waarvan de lichtstip door de lens L_1 onscherp op N wordt afgebeeld. Het licht dat door het negatief N en het positiefmateriaal P is doorgelaten, wordt door de tweede lens L_2 geconcentreerd op de fotomultiplier V. Het signaal hiervan bestuurt de sterkte van de lichtstip van K zodanig dat de verlichtingssterkte van P, gemiddeld over het gebied van de onscherpte, constant blijft.

slechts verminderen. De gewenste harmonisering van de fotografische afdruk krijgt men nu, door de aftastende lichtstip met een bepaalde onscherpte op het te kopiëren negatief af te beelden. Evenals in het procédé van Spiegler blijven dan de detailcontrasten in gebieden die kleiner zijn dan de onscherpte bewaard, terwijl de contrasten in grotere gebieden worden genivelleerd. Desgewenst kan men dus voor het positief een fotografisch materiaal met steile zwartingskromme kiezen.

Is men toch eenmaal ertoe overgegaan uit het arsenaal van de televisietechniek te putten, dan kan men ook wel geheel van de fotografie afstappen en, zich beperkende tot een weergave van de röntgenfoto als televisiebeeld, naar mogelijkheden zoeken dit beeld te harmoniseren. Lukt dit, dan is een harmonisering langs deze weg bijzonder aantrekkelijk, aangezien de weergave der contrasten in een televisiebeeld op eenvoudige wijze kan worden gevarieerd, zodat de röntgenoloog tijdens het bekijken van het televisiebeeld het karakter hiervan continu kan veranderen. Door telkens te vergelijken met het origineel, kan hij dan de gunstigste instelling voor het beeld vinden. Dit aantrekkelijke perspectief was voor ons, alsook voor verschillende andere onderzoekers, aanleiding de genoemde mogelijkheid te onderzoeken.

In het Philipslaboratorium te Eindhoven hebben W. J. Oosterkamp en Th. G. Schut televisiebeelden geharmoniseerd volgens het principe van de boven ter vergelijking vermelde automatische sterkteregeling ⁵⁾. Bij het lijn voor lijn aftasten

helderheidsverschillen over lengten groter dan de genoemde fractie worden vereffend, terwijl dergelijke verschillen over kleinere lengten onaangestast blijven. De vorming van het genoemde gemiddelde dient natuurlijk bij voorkeur te geschieden over een gedeelte van de lijn dat aan weerskanten van het weer te geven beeldpunt ligt. Te dien einde kan men het beeldsignaal, alvorens men het harmoniseringssignaal eraan toevoegt, over een vertraginglijn laten lopen.

Bij de geschetste methode worden niet alleen alle grove contrasten vereffend, doch ook die detailcontrasten waarvan de gradiënt géén component in de richting van de lijnaftasting bezit. Vertoont het beeld b.v. een structuur van zwarte en witte streken, dan wordt het gewenste effect alleen verkregen wanneer we de aftastrichting loodrecht op de streken kiezen: de streken worden dan uniform grijs weergegeven en de randen worden sterk naar voren gebracht — dat is immers de bedoeling van de harmonisering. Daarentegen verdwijnt de gehele structuur van streken vrijwel volledig wanneer de aftastlijnen evenwijdig met de streken lopen. Men kan dit effect zeer goed waarnemen aan de ribben in een longopname.

Een ander televisieprocédé voor het bekijken van röntgenbeelden, dat we in dit verband nog zouden willen noemen, lijkt aan hetzelfde euvel. Bij dit procédé wordt het beeldsignaal van het afgetaste beeld geleid over een differentiatienetwerk ⁶⁾. Daardoor worden weer alle overgangen tussen naburige gebieden met verschillende helderheid sterk naar voren gebracht, en wel des te sterker naarmate de overgang scherper is. Hoewel

⁵⁾ Mondelinge mededeling.

⁶⁾ K. Bischoff en O. Schott, Fortschr. Röntgenstr. **87**, 239, 1957.

men hierbij feitelijk met een andere soort beïnvloeding van het beeld te maken heeft, ligt het voor de hand dit procédé met dat van Oosterkamp en Schut te vergelijken. Wederom wordt een effect alleen verkregen voor zover de helderheidsgradiënten van de details gelegen zijn in de richting van de lijnaftasting.

Uit de nu volgende beschrijving van ons toestel zal blijken, dat het genoemde nadeel daarbij vermeden is.

Principe van de Ampliscoop: dubbele beeldaftasting

Bij de Ampliscoop worden twee normale, met vidicons uitgeruste, televisiecamera's op de te bekijken röntgenfoto gericht (fig. 4). De optiek van de ene camera beeldt op normale wijze de foto scherp af op de lichtgevoelige laag van het vidicon, waar de afbeelding wordt afgetast. Deze camera levert het eigenlijke beeldsignaal voor de weergave van de foto op het scherm van een beeldbuis. De optiek van de andere camera daarentegen ontwerpt een *onscherp* beeld van de foto op het bijbehorende vidicon. Andersom gezegd: elk punt van de lichtge-

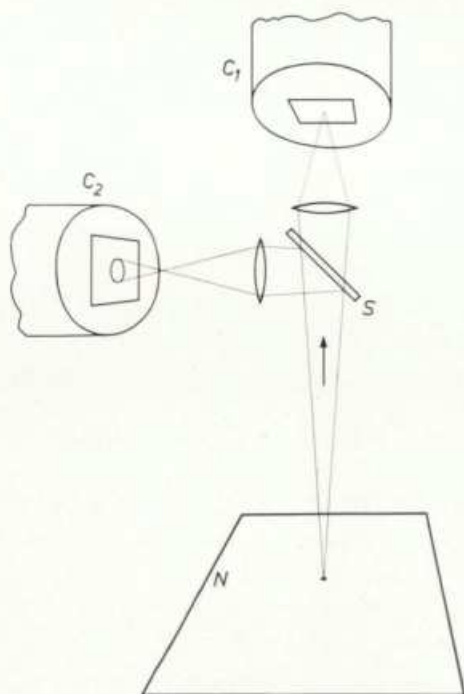


Fig. 4. Principe van de Ampliscoop. De te harmoniseren röntgenfoto *N* wordt scherp afgebeeld op de lichtgevoelige laag van het vidicon *C*₁ en, via de halfreflecterende spiegel *S*, onscherp op die van het vidicon *C*₂. De beide lagen worden door hun respectieve elektronenbundel synchroon afgetast, hetgeen bij benadering hierop neerkomt dat de foto gelijktijdig met een scherpe en met een onscherpe vlek wordt afgetast. *C*₁ levert het eigenlijke beeldsignaal; het signaal van *C*₂ wordt met omgekeerd teken en met regelbare verhouding van de amplitude erbij opgeteld, waardoor de harmonisering wordt teweeggebracht.

voelige laag ontvangt hier licht van een zeker gebied van de foto, deze wordt als het ware met een onscherpe vlek afgetast. Het door de aftasting verkregen signaal van deze camera is dus op ieder moment een maat voor de gemiddelde helderheid van de foto (gemiddelde doorlating van het röntgennegatief) in een gebied ter grootte van de onscherpte. Dit signaal wordt nu met omgekeerd teken en met regelbare sterkteverhouding toegevoegd aan het signaal van de eerste camera. Na het voorafgaande zal het duidelijk zijn dat hiermee een harmonisering van het weer te geven beeld kan worden verkregen. Bovendien kan deze harmonisering in dubbel opzicht zeer eenvoudig worden geregeld: ten eerste kan men door regeling van de amplitudeverhouding bij de menging de mate van vereffening der helderheidsverschillen variëren (bij menging met gelijke amplitudes b.v. krijgt men in het gehele beeldvlak een constante gemiddelde helderheid). Ten tweede kan men door wijziging van de instelling van de optiek van de tweede camera de onscherpte veranderen, dus de grootte van het gebied waarover gemiddeld wordt en daarmee de grootte van de details waarvan de contrasten in het signaal van de eerste camera worden weergegeven zonder aantasting door de menging.

Het gebied van de onscherpte is bij benadering een cirkeloppervlak. De aftastrichting (richting van de beeldlijnen) speelt dus geen rol, en het karakter van het geharmoniseerde beeld wordt nagenoeg niet gewijzigd indien men de röntgenfoto tijdens het bekijken in zijn eigen vlak draait. Natuurlijk is dit alleen dan waar — en vindt de harmonisering alleen dan op de gewenste wijze plaats — indien de röntgenfoto wat betreft de ligging van het afgetaste oppervlak congruent op de beide vidicons wordt afgebeeld.

De contrastversterking

In de inleiding hebben wij uiteengezet dat in vele gevallen de harmonisering tot doel heeft een contrastversterking mogelijk te maken. Deze versterking kan bij de fotografische harmoniseringsmethodes rechtstreeks worden verkregen door gebruik te maken van de eigenschappen van het fotografische materiaal (zwartingskromme met grote gamma). Ook bij de televisiemethodes zou men op soortgelijke wijze een contrastversterking teweeg kunnen brengen. In een televisiebeeld wordt nl. de vertaling van de verschillende helderheden van het object in verschillende helderheden van het beeldscherm bepaald door een „overbrengingsfunctie”, die beantwoordt aan de zwartingskromme in het fotogra-

fische geval. Men spreekt van een „gamma” van de keten, en deze is gelijk aan het produkt van de gamma's der afzonderlijke schakels. De vidiconbuis heeft bij benadering een $\gamma = 0,5$, de beeldbuis een $\gamma = 2$ tot 3 , de videoversterker in het „vervormings-vrije” (lineaire) gebied een $\gamma = 1$, zodat de gehele keten normaal een $\gamma \approx 1$ heeft. Een overbrengings-functie met een grotere en bovendien regelbare waarde van de gamma zou men op de bekende wijze kunnen realiseren door toevoegen van een schakel die een regelbare vervorming introduceert ⁷⁾. Bij de constructie van de Ampliscoop is echter gebleken dat een dergelijk hulpmiddel niet vereist is: de regelbare contrastversterking kan in de gegeven opstelling veel eenvoudiger worden verkregen door gebruik te maken van het zg. Callier-effect.

Dit effect bestaat daarin dat de effectieve zwarting van een film wordt vergroot indien men hem met gerichte in plaats van de gebruikelijke diffuse belichting bekijkt. De oorzaak hiervan is dat de verzwakking van het doorgaande licht in de zwarte emulsie voor een belangrijk deel niet aan absorptie, doch aan verstrooiing moet worden toegeschreven; in fig. 5 is dit geschetst en nader toegelicht. Men beschouwe de beide extreme gevallen, nl. ten eerste een geheel diffuse verlichting, d.w.z. verlichting met een lichtbron die van ieder gedeelte van de film uit gezien de ruimtehoek 2π beslaat, en ten tweede een ideaal gerichte verlichting, d.w.z. met een puntvormige lichtbron, waarbij de genoemde ruimtehoek $= 0$ is. Hebben twee gedeelten van de film in het eerste geval b.v. een zwartingsverschil $\Delta S = 1,8$, hetgeen betekent dat een fotocel achter het ene gedeelte ca. $60\times$ minder licht ontvangt dan een cel achter het andere gedeelte, dan zal in het tweede geval een zwartingsverschil $\Delta S' = 2,9$ worden gemeten, d.w.z. nu ontvangt de ene fotocel ca. $800\times$ minder licht dan de andere. De mate van de verkregen „contrast-versterking”, $\Delta S'/\Delta S$ (de zg. Callier-coëfficiënt, in het beschouwde uiterste geval $= 1,6$), kan in principe op eenvoudige wijze worden ingesteld door de lichtbron niet puntvormig te maken, doch hem een regelbare afmeting te geven. Te dien einde hebben wij, na enig geëxperimenteer, een verlicht matglas met een irisdiaphragma als lichtbron gekozen.

De hierboven gegeven beschouwing gaat bij een vrijwel puntvormige lichtbron klaarblijkelijk alleen voor het midden van het beeld op. Om alle gedeelten van het beeld op de beschreven wijze met gericht

licht te doorstralen, plaatsen we achter de film een condensorlens, die de lichtbron afbeeldt op de intrepupil van de vidiconcamera. Met het oog op de vereiste grote afmetingen kan men voor deze lens het best een fresnellens nemen.

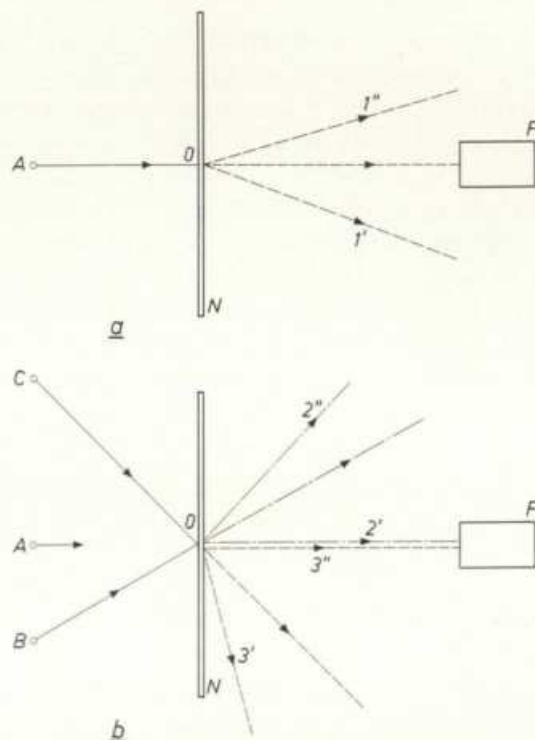


Fig. 5. Ter verklaring van het Callier-effect.

a) Wil men de zwarting ter plaatse O van het negatief N meten en komt de hierop vallende lichthoeveelheid I_0 uitsluitend van het punt A , dan is het in de ontvanger F gemeten doorgaande licht (I_1) niet slechts verzwakt door absorptie, maar vooral door verstrooiing (gedeelten I' en I'' van het licht). b) Valt ook licht uit punten B en C op de plaats O , dan komen ten gevolge van de sterke invloed van de verstrooiing ook betrekkelijk grote lichtbijdragen $2'$ en $3'$ in de ontvanger. De totale verhouding I_0/I_1 wordt daardoor kleiner dan in geval (a).

Enkele bijzonderheden van het toestel

In fig. 6 is het toestel in zijn geheel weergegeven. We willen nu nog enkele details van de bouw en van de schakeling bespreken en vervolgens de verkregen resultaten met enkele voorbeelden illustreren.

Fig. 7 toont schematisch hoe de onderdelen in het toestel zijn geplaatst. De te bekijken röntgenfoto wordt op de (niet-gematteerde) glazen plaat H gelegd, die gemakshalve iets schuin is geplaatst en waarachter de hierboven genoemde fresnellens en de regelbare lichtbron zijn aangebracht. De foto wordt door de optieken van de beide camera's C_1 en C_2 afgebeeld op het respectieve vidicon — in C_1 scherp, in C_2 onscherp. Aanvankelijk gebruikten wij verwisselbare objectieven voor ieder van de beide camera's, doch naderhand hebben wij deze voorzien van twee identieke lenzen met variabele brandpuntsafstand (Zoom-lenzen), waarbij de schaal

⁷⁾ De schakeling van een dergelijke „gamma-corrector”, zij het dan alleen voor gammawaarden < 1 , is b.v. beschreven in het aangehaalde artikel ⁴⁾, blz. 224-226.

van de afbeelding continu van 1:1 tot 2:1 kan worden gevarieerd. Een vergrote afbeelding op het vidicon heeft het voordeel dat beter gebruik wordt gemaakt van het scheidend vermogen van het televisiebeeld, dat uiteraard door het lijnenraster is beperkt⁸⁾.

De aftastende elektronenbundels in de beide camera's worden bestuurd door de bijbehorende stuurtoestellen (S_1 en S_2), waarvan we de frequentiegeneratoren hebben gekoppeld ten einde de beide aftastingen te synchroniseren. De uit C_1 en C_2 verkregen signalen worden opgeteld in de mengtrap M , waarna het totale signaal wordt toegevoerd aan de videoversterker van de ene camera (de versterker van de andere camera blijft in ons geval ongebruikt). De beeldbuis B , waarop het geharmoniseerde beeld verschijnt, is ongeveer op ooghoogte van de waarnemer geplaatst.

Van belang is dat de waarnemer de harmonisering kan regelen en daarbij doorlopend het geharmoniseerde beeld kan vergelijken met het origineel — deze mogelijkheid is immers juist het voordeel waar het ons om begonnen was. Ter wille van de regeling van de harmonisering zijn de regelknoppen voor de mengtrap en voor de optiek van de camera met de onscherpe afbeelding zo geplaatst dat de waarnemer er gemakkelijk bij kan. Voor het regelen van de contrastversterking kan hij de opening van het eerder vermelde irisdiafragma met behulp van een bowdenkabel variëren; de desbetreffende regelknop is gekoppeld met een potentiometer die tegelijkertijd de lichtsterkte van de lamp zodanig verandert dat de gehele lichtstroom die door het diafragma treedt, onveranderd blijft. Er zijn nog twee maatregelen genomen om gelijktijdige waarneming van het origineel (op H) en van het geharmoniseerde beeld (op B) mogelijk te maken. Ten eerste is achter de doorlichtplaat een tweede naar verkiezing inschakelbare verlichting aangebracht, waarvan de stralen niet op de camera kunnen vallen, doch wel op het oog, terwijl de plaats en kijkrichting hiervan nog een zekere vrijheid hebben. Ten tweede werd het stuurtoestel van de beeldbuis door toevoeging van een inductieve spanningsdeler zodanig gewijzigd dat het uit 625 lijnen bestaande beeld niet wordt geschreven op het gehele oppervlak van het scherm van de beeldbuis (diagonaal 35 cm), doch slechts op een rechthoek van 10×15 cm. Bij de Ampliscoop is er nl. op gerekend dat dit scherm wordt bekeken uit een afstand van 30-35 cm; door



Fig. 6. Experimentele uitvoering van de Ampliscoop. H glazen plaat, waarop de te bekijken röntgenfoto wordt gelegd. B beeldscherm van de televisiebeeldbuis, waarop het geharmoniseerde beeld verschijnt. Bij 1 en 2 bevinden zich de handvatten waarmee men de optieken van de camera's kan instellen. Met de knop R_1 wordt de mate van harmonisering gevarieerd (het negatief kan daarbij door eenvoudige omkering van de signalen desgewenst ook als positief zichtbaar worden gemaakt; zie hiervoor b.v. het in ⁴⁾ geciteerde artikel). Met knop R_2 regelt men de versterking, met R_3 de gemiddelde beeldhelderheid. Links van H bevinden zich een hoofdschakelaar, een schakelaar voor de lichtbron die de waar te nemen foto verlicht, en een schakelaar voor de kamerverlichting.

het beeld niet groter dan 10×15 cm te maken, zorgen we dat het lijnenraster niet storend zichtbaar wordt, en tevens dat het origineel en het geharmoniseerde beeld ongeveer in dezelfde schijnbare grootte worden waargenomen. Nog beter zou het natuurlijk zijn de 35-cm-beeldbuis te vervangen door een kleinere, waarbij dan de schermoppervlakte volledig wordt benut.

Op de elektrische schakeling willen we hier niet diep ingaan. Zoals uit het bovenstaande blijkt,

⁸⁾ In ons geval zou bij een vergroting van 2,5:1 hetzelfde effectieve scheidend vermogen worden verkregen als de directe (met versterkingsfoelies opgenomen) röntgenfoto bezit.

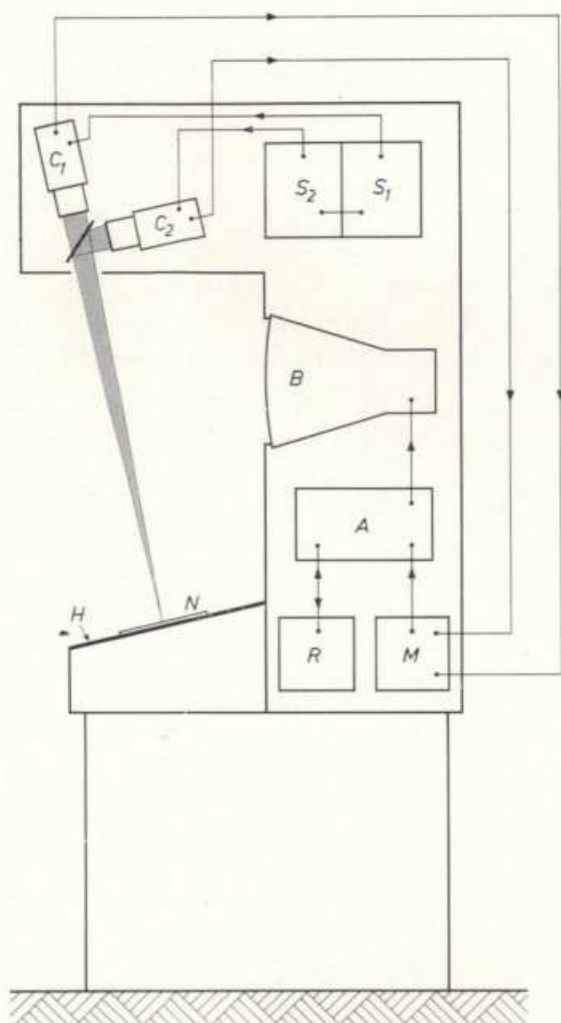


Fig. 7. Bouw van de Ampliscope in de experimentele uitvoering, schematisch. *H* glazen plaat, waarop de te bekijken röntgenfoto *N* wordt gelegd, met hierachter lichtbron en fresnellens. *C*₁ en *C*₂ twee vidiconcamera's (typenummer GM 4930), uitgerust met Zoom-lenzen. *S*₁ en *S*₂ de bijbehorende stuurapparaten (GM 4948). *A* videoversterker van een van de beide camera's. *B* 35-cm-beeldbuis. *M* mengtrap. *R* schakeling voor het automatisch constanthouden van de gemiddelde beeldhelderheid, waarbij de gewenste waarde met de hand kan worden ingesteld.

bestaat zij voor het grootste gedeelte uit normale televisie-apparatuur, en de meeste toevoegingen of wijzigingen (in de mengtrap en in het stuurtoestel) lijken ons voor onze lezers niet speciaal interessant. Slechts een bijzonderheid willen wij nog nader bespreken, nl. de regeling van de gemiddelde helderheid van het geharmoniseerde beeld.

Iedere in de handel verkrijgbare televisie-ontvanger bezit een instelmogelijkheid voor de „helderheid” en een voor het „contrast”. Bij bediening van de regelknop voor de „helderheid” wijzigt men de voorspanning van het stuurrooster van de beeldbuis en daarmee de schermhelderheid in geval van afwezigheid van een beeldsignaal (het „zwartniveau”). Voor de objectief beste weergave van de helderheidsverschillen in het origineel is het nor-

maal gewenst dit zwartniveau in het afknijppunt van de karakteristiek van de beeldbuis of eventueel iets boven dit punt te leggen, en het daar te houden. Bij bediening van de regelknop voor het „contrast” wijzigt men de versterking van het beeldsignaal dat wordt toegevoerd aan het stuurrooster van de beeldbuis. Van een verandering van de contrasten is dus eigenlijk geen sprake, de overbrengingsfunctie van de televisieketen wordt immers niet beïnvloed, de resulterende gammawaarde blijft ≈ 1 . Het nut van deze instelling is, dat in geval van een origineel met geringe helderheidsomvang een beter gebruik gemaakt kan worden van de beschikbare helderheidsomvang van de keten — tussen de onderste grens, die door de ruis, en de bovenste grens, die door oversturing van de beeldbuis wordt gesteld.

Voor ons doel zijn beide manieren van regelen niet erg geschikt. Neem eerst de regeling van de versterking: aangezien een goed gebruik van de beschikbare helderheidsomvang op het beeldscherm essentieel is voor optimale waarneming, zou het onjuist zijn hiervoor te volstaan met nu en dan eens bijregelen met de hand. In plaats daarvan hebben we een automatische regeling van de versterking ingebouwd, die uitgaat van de grootste mogelijke waarde van de versterking en die het uitgangssignaal van de videoversterker telkens omlaag regelt tot de toelaatbare waarde zodra de amplitude van het ingangssignaal een zekere drempelwaarde overschrijdt. En wat betreft de regeling van de helderheid: de beschreven fixering van het zwartniveau is bij de normale waarneming op zijn plaats, doch bij de waarneming van een geharmoniseerd beeld ligt het meer voor de hand de gemiddelde helderheid van het beeld constant te houden. We hebben derhalve de Ampliscope zo geconstrueerd dat bij inschakelen van het beeldsignaal van de harmoniseringcamera tevens (met een vertraging van ongeveer 1 seconde) van de normale fixering van het zwartniveau wordt overgeschakeld op een automatische regeling van de gemiddelde helderheid. Deze regeling bevat een *RC*-keten (tijdconstante 0,13 s), waarover het videosignaal wordt gemiddeld. Het verschil tussen de gemiddelde waarde en een vaste vergelijkingswaarde bepaalt de voorspanning die het stuurrooster van de beeldbuis krijgt. Men kan nu de „helderheid” van het beeld nog met de hand regelen door instellen van de genoemde vaste vergelijkingswaarde.

Een andere uitvoering van de dubbele beeldaftasting

Hoewel er in het hier beschreven toestel geen gebruik van gemaakt is, willen wij compleetheidshalve nog een andere mogelijkheid voor het realiseren van de dubbele beeldaftasting

vermelden. Bij deze uitvoering vermijdt men alle problemen wat betreft de hierboven geëiste congruentie tussen de twee afgetaste gedeelten van het beeld, en deze uitvoering lijkt ons daarom voor de verdere ontwikkeling van de Ampliscoop bijzonder geschikt. Schematisch is de opstelling weergegeven in fig. 8. De röntgenfoto wordt hier rechtstreeks afgetast door de lichtstip van een lichtstipaftaster⁴⁾, die door middel van een Zoom-lens scherp is afgebeeld op de foto. In de weg der stralen is echter een selectief reflecterende spiegel S_1 geplaatst, die b.v. alleen het groene gedeelte van het licht doorlaat, het rode gedeelte daarentegen terugkaatst. Dit rode gedeelte van het licht wordt door een normale hoekspiegel S via een tweede, met S_1 identieke, kleurselectieve spiegel S_2 weer teruggebracht

De belichting met de aftastende lichtstip zal in het algemeen niet voldoende zijn om een gelijktijdige normale waarneming van de röntgenfoto mogelijk te maken. Een eenvoudige oplossing hiervoor bestaat daarin, de foto tevens met een stroboscooplamp te belichten, die men synchroniseert met de impuls die telkens de aftasting inleidt. Aangezien tijdens deze impuls de beide fotomultiplicatorbuizen buiten werking zijn gesteld, heeft het licht van de stroboscooplamp geen invloed op de kwaliteit van het geharmoniseerde beeld.

Enkele resultaten

Ter illustratie van de verbeterde waarneming die door de harmonisering mogelijk wordt gemaakt,

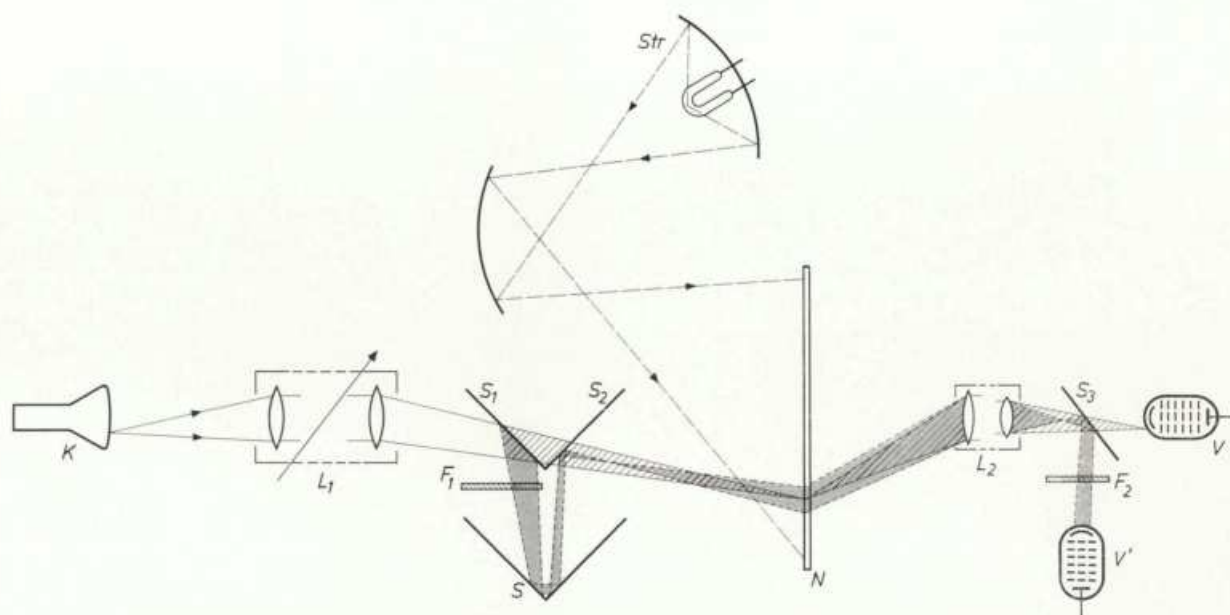


Fig. 8. Dubbele beeldaftasting volgens een andere methode (splijting van een optisch kanaal in tweeën). K lichtstipaftastbuis. L_1 Zoom-lens. N te bekijken röntgenfoto. S_1 - S_2 twee kleurselectieve spiegels, die een gedeelte van het licht, b.v. het groen, doorlaten terwijl ze het overige licht (rood) reflecteren. De normale hoekspiegel S brengt het rode gedeelte van het licht, dat dus een omweg maakt, weer in de oorspronkelijke weg van de stralen terug. Op de röntgenfoto N wordt op deze wijze een scherp groen beeld en terzelfder plaatse een onscherp rood beeld van de aftaststip geproduceerd. De lens L_2 concentreert het doorgelaten licht op de twee fotomultiplicators V en V' , waarbij de kleurselectieve spiegel S_3 weer de twee gedeelten van het licht scheidt. Eventueel kan de kleurseparatie worden ondersteund door filters F_1 en F_2 . Str verlichtingssysteem met stroboscooplamp.

tot de oorspronkelijke weg van de stralen, zoals fig. 8 toont. Ten gevolge van de omweg die het rode licht heeft gemaakt, wordt dit gedeelte van het licht onscherp op de foto afgebeeld, waarbij de mate van onscherpte nog op eenvoudige wijze kan worden geregeld door de hoekspiegel S te verschuiven. Het door de röntgenfoto gaande licht (waarbij men weer profijt trekt van het Callier-effect) wordt door een tweede lens geconcentreerd op twee fotomultiplicatorbuizen, waarbij een derde kleurselectieve spiegel S_3 ervoor zorgt dat de ene buis alleen het groene en de andere alleen het rode licht ontvangt. Men krijgt dus, evenals in het geval van de twee vidiconcamera's, twee beeldsignalen waarvan het ene het resultaat is van een scherpe, het andere van een onscherpe aftasting, en men gebruikt deze signalen verder op dezelfde wijze als boven beschreven.

reproduceren wij hier enkele foto's, gemaakt van beelden op het beeldscherm, te samen met de oorspronkelijke röntgenfoto's. In fig. 9a is een foto van een schedel weergegeven; het middelste gedeelte hiervan ziet men in fig. 9b in volledig geharmoniseerde vorm (menging van de beide signalen met gelijke amplitude). Fig. 10a en b zijn analoge opnamen van een onderbeen. In beide gevallen is het effect zeer duidelijk.

Hiermee is niet gezegd dat ook het voordeel voor de röntgenoloog zomaar duidelijk is. Zoals in vele gevallen, moet hier worden opgemerkt dat de reproductie geen juiste voorstelling van de relatieve



Fig. 9. a) Röntgenfoto van een schedel, bij normale waarneming. b) Foto van het scherm van de beeldbuis, waarop het geharmoniseerde beeld van het middelste gedeelte van de foto (a).

waarde van de beelden kan geven. Men weet dat de helderheidsomvang van een op papier weergegeven beeld beperkt is (maximale helderheidsver-



Fig. 10. a) Röntgenfoto van een gedeelte van een onderbeen, bij normale waarneming. b) Foto van het scherm van de beeldbuis, met het geharmoniseerde beeld van het bovenste gedeelte van de foto (a).

houding ongeveer 1 : 10). Het is hierdoor onmogelijk de grote zwartingsverschillen van een röntgennegatief (helderheidsomvang 1 : 100 of nog meer) getrouw weer te geven. De vereffening van de grove contrasten door de harmonisering nu maakt dat bij de reproductie van een geharmoniseerd beeld op papier dit „origineel” veel beter wordt benaderd. Een onervaren beschouwer van de gereproduceerde beelden zal derhalve, ten gevolge van de relatieve benadeling van de oorspronkelijke röntgenfoto, ertoe neigen de waarde van de harmonisering te overschatten.

Ten aanzien van de werkelijke diagnostische betekenis van de harmonisering moet de beoordeling dus aan de ervaren röntgenoloog worden overgelaten. Hoewel nog niet veel ervaring met de Ampliscoop is opgedaan, kan o.a. worden gewezen op een reeks experimenten die A. Bonse in het Straleninstituut van de Universiteits-Huidkliniek te Würzburg met het toestel heeft uitgevoerd, en waarbij hij gunstige resultaten heeft verkregen ⁹⁾.

Een opmerking dient nog te worden gemaakt over het zojuist vermelde feit dat de geharmoniseerde beelden zich veel beter lenen voor reproductie in druk, aangezien zij de essentiële informatie-inhoud van de originele foto's naar voren brengen, zodat men niet gedwongen is de gehele informatie daarvan binnen de veel te kleine helderheidsomvang van het papier te persen: dit feit geeft aanleiding tot de verwachting dat de harmonisering ingang zal vinden als hulpmiddel voor het in druk reproduceren van röntgenfoto's ¹⁰⁾! Voor hetzelfde doel kan natuurlijk ook het „LogEtron“-procédé ³⁾ dienen, maar de Ampliscoop heeft dan het bovenvermelde voordeel dat de wijze van harmoniseren visueel gecontroleerd en zo gunstig mogelijk ingesteld kan worden.

⁹⁾ A. Bonse, nog niet gepubliceerd.

¹⁰⁾ Hierop is gewezen door W. J. Oosterkamp. Zie: *Ärztliche Forschung* 16, I 124, 1962 (no. 3).

Er is ook reeds gebleken dat het toestel buiten het gebied van de röntgendiagnostiek met voordeel kan worden toegepast. Zo kon op de Sterrenwacht te München nuttig gebruik gemaakt worden van de Ampliscoop voor het uitmeten van foto's van de sterrenhemel, die genomen waren tijdens een zonsverduistering ¹¹⁾. Op de platen, die ten gevolge van sterke sluiering slechts een gering contrast hadden, moesten de plaatsen van een groot aantal sterren nauwkeurig worden bepaald voor het berekenen van de afbuiging van het licht in het gravitatieveld van de zon. In dit geval was geen harmonisering nodig, maar er werd slechts gebruik gemaakt van de contrastversterking door het Callier-effect.

¹¹⁾ F. Schmeidler, *Naturwiss.* 49, 463, 1962 (no. 20).

Samenvatting. Om op een gegeven röntgenfoto zwakke detailcontrasten te kunnen zien, of eventueel versterkt weer te geven, kan het gewenst zijn de grove contrasten geheel of gedeeltelijk te vereffen. In de Ampliscoop wordt deze zg. harmonisering van het beeld teweeggebracht door dit met twee vidiconcamera's te bekijken. Op de ene camera wordt de foto scherp afgebeeld, op de andere onscherp, en de twee beeldsignalen worden met een regelbare onderlinge verhouding bij elkaar opgeteld. De beeldmodulatie in gebieden groter dan de onscherpte kan op deze wijze worden opgeheven of verzwakt, en wel onafhankelijk van de richting van de afastlijnen op het beeld. Een gelijktijdige versterking van het contrast wordt gerealiseerd door gebruik te maken van het Callier-effect. De bouw van het toestel en de mogelijkheden van regeling worden in het artikel in grote lijnen beschreven en er worden enkele resultaten getoond.

VERSCHILVERSTERKERS MET EEN REJECTIEFACTOR GROTER DAN EEN MILJOEN

door G. KLEIN *) en J. J. ZAALBERG van ZELST *).

621.317.725.083.6:621.375

In de verschillende Philipslaboratoria bestaat voortdurend vraag naar speciale elektronische meetapparatuur, die aan zeer uiteenlopende eisen moet voldoen. Bovengenoemde auteurs behoren tot die leden van de staf van het Natuurkundig Laboratorium wier taak het is, in deze behoefte te voorzien. Onder de talrijke schakelingen die zij in de loop der jaren hebben ontwikkeld, zijn er verscheiden die met eenvoudige middelen tot verrassende resultaten leiden. Een aantal van deze schakelingen zullen in een reeks artikelen in dit tijdschrift worden behandeld. Het eerste artikel volgt hieronder. Het sluit aan bij de artikelen over verschilversterkers die in onze jaargangen 22 en 23 zijn verschenen en laat zien, op welke wijze de uitzonderlijk grote rejectiefactor is verkregen die in een bijzonder geval noodzakelijk was.

De rejectiefactor van een verschilversterker

In de meettechniek komt het vaak voor dat men de elektrische spanning tussen twee punten moet meten terwijl deze punten ten opzichte van aarde een spanning vertonen die veel groter is dan de te meten spanning. Dit vraagstuk is niet zo heel eenvoudig op te lossen indien de te meten spanning (het ingangssignaal) zo klein is dat versterking noodzakelijk is. Eén van de moeilijkheden is dan dat de spanning tussen de uitgangsklemmen van de versterker in het algemeen niet alleen een functie van het ingangssignaal is, maar ook een functie van de spanning der ingangsklemmen ten opzichte van aarde. Dit storende effect wordt tegengegaan in speciale versterkers. Deze zg. verschilversterkers zijn al enige malen onderwerp van artikelen in dit tijdschrift geweest ¹⁾).

Uit deze artikelen nemen wij de nomenclatuur over die in fig. 1 is aangeduid. Het ingangssignaal is $2E_{it}$. De spanning $2E_{ut}$ tussen de uitgangsklemmen is die waarop het meetinstrument reageert. E_{if} en E_{uf} zijn de gemiddelde spanning der ingangs- resp. uitgangsklemmen ten opzichte van aarde. E_{if} en E_{uf} noemen wij de fazespanningen, E_{it} en E_{ut} de tegenfasesignalen. De letter E kan zowel een gelijk- als een wisselspanning aanduiden. De frequenties van E_{it} en E_{if} behoeven niet gelijk te zijn.

In het algemeen is

$$E_{ut} = AE_{it} + BE_{if} \quad \dots (1)$$

Hierin is A de versterking die E_{it} ondergaat, en

de term BE_{if} vertegenwoordigt het storende effect door E_{if} . In een goede verschilversterker is B veel kleiner dan A . De verhouding $H = A/B$ heet rejectiefactor en is een van de belangrijkste karakteristieke grootheden van een verschilversterker.

In het onder ²⁾ aangehaalde artikel I zijn voorbeelden van verschilversterkers genoemd waarvan de gegarandeerde ³⁾ waarde H_{min} van de rejectiefactor ca. 2×10^4 bedraagt. Deze geldt voor balansversterkers waarin door bijzondere maatregelen een hoge graad van symmetrie is verkregen (bij volkomen symmetrie is de factor B in verg. (1)

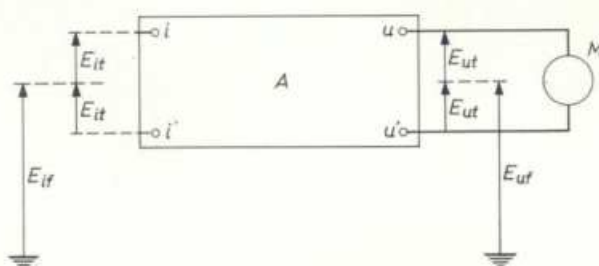


Fig. 1. Verschilversterker A met ingangsklemmen $i-i'$, waartussen het te meten signaal $2E_{it}$ staat, en met uitgangsklemmen $u-u'$, waartussen de spanning $2E_{ut}$ staat en waarop het meetinstrument M is aangesloten. De spanning van de klemmen i , i' , u en u' ten opzichte van aarde is resp. $E_{if} + E_{it}$, $E_{if} - E_{it}$, $E_{uf} + E_{ut}$ en $E_{uf} - E_{ut}$. De spanningen E_{it} en E_{ut} zijn de tegenfasesignalen; E_{if} en E_{uf} zijn de (storende) fazespanningen. E_{if} kan veel groter zijn dan E_{it} en een andere frequentie hebben.

³⁾ Men moet wel onderscheid maken tussen de gegarandeerde waarde en de werkelijke waarde van de rejectiefactor. Onder de gegarandeerde waarde H_{min} verstaan wij de door berekening gevonden waarde van H voor het geval dat alle parameters van de schakeling die invloed op de rejectie hebben, 10% in de ongunstigste richting afwijken van de nominale waarde. In werkelijkheid zal deze ongunstige samenloop van omstandigheden zich natuurlijk uiterst zelden voordoen. De werkelijke (gemeten) waarde van H zal dan ook bijna altijd aanzienlijk groter dan H_{min} zijn; zie b.v. fig. 13, 15 en 17 van het in ²⁾ aangehaalde artikel I.

*) Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

¹⁾ G. Klein en J. J. Zaalberg van Zelst, Algemene beschouwingen over verschilversterkers, Philips techn. T. 22, 366-373, 1960.

²⁾ G. Klein en J. J. Zaalberg van Zelst, Schakelingen voor verschilversterkers, I en II, Philips techn. T. 23, 69-78 en 119-127, 1961 (nos. 3 en 4).

gelijk aan nul, H dus oneindig groot). De maatregelen bestaan hierin dat buizen met een grote versterkingsfactor μ worden gebruikt en dat in de gemeenschappelijke katodeleiding een element of schakeling met zeer hoge differentiaalweerstand R_d is opgenomen (deze kan op verschillende manieren worden verwezenlijkt). De genoemde waarde van 2×10^4 is voor de meeste gevallen ruim voldoende.

Een meetprobleem dat zich enige tijd geleden heeft voorgedaan, is de aanleiding is geweest om het vraagstuk van verschilversterkers met een nog veel grotere rejectiefactor toch in studie te nemen. De vraag betrof een opstelling voor het meten van het halleffect aan proefstaafjes van verschillend materiaal. Deze opstelling is in fig. 2 schematisch weergegeven en in het onderschrift toegelicht. De te meten hallspanning, waarvan de frequentie hier varieerde van 50 tot 200 Hz, kan zo klein zijn (van de orde van een microvolt) dat een miljoenvoudige versterking nodig is. Dit zou geen bijzondere moeilijkheden opleveren als niet in sommige proefstaafjes de spanningsval zo groot was dat de elektrodes een spanning E_{if} ten opzichte van aarde kregen die 10^5 tot 10^6 maal zo groot was als de te meten spanning; bovendien heeft E_{if} dezelfde frequentie als de hallspanning. Dit maakte dat voor de rejectiefactor van de versterker de buitengewoon grote gegarandeerde minimumwaarde van meer dan een miljoen moest worden verlangd. E_{if} kon

in het ongunstigste geval een amplitude van ca. 200 V bereiken.

Om een grotere rejectiefactor dan 2×10^4 te kunnen garanderen, zou men, behalve de versterkingsfactor μ , de differentiaalweerstand R_d in de gemeenschappelijke katodeleiding willen opvoeren. Dit laatste heeft echter alleen zin zolang de impedantie, gevormd door de parasitaire capaciteit die R_d overbrugt, hoger dan R_d is. Men kan zodoende dus een des te betere rejectie verkrijgen naarmate de parasitaire capaciteit kleiner en de frequentie lager is. Op deze manier zou men bij lage frequenties en door uiterst zorgvuldige constructie van de versterker misschien nog wel een rejectiefactor van 10^5 kunnen garanderen. In het zoëven genoemde geval werd echter een zeker nog tien maal zo grote rejectie gevraagd. Om daaraan te voldoen, moest de oplossing dus in een andere richting gezocht worden.

Als het te meten signaal een wisselspanning is — zoals hier —, zou men in principe de oplossing kunnen zoeken in het gebruik van een scheidingstransformator tussen de signaalbron en de ingang van de versterker (die dan geen balansversterker meer behoeft te zijn). Twee redenen echter hebben ons ervan weerhouden, deze oplossing te kiezen:

- 1) De ingangsimpedantie van de transformator moet niet veel lager dan de inwendige weerstand van de signaalbron zijn. Is deze weerstand hoog (zoals bij een hallspanningsgenerator) en is bovendien de frequentie laag, dan volgt uit deze voorwaarde dat de primaire spoel van de transformator een onpraktisch grote zelfinductie zou moeten hebben.
- 2) De wikkelingen van de transformator zijn moeilijk zo goed van elkaar af te schermen dat de invloed van een grote fazespanning E_{if} klein genoeg wordt.

Combinatie van een „zwevende” en een gewone verschilversterker

In het artikel I²⁾ is terloops als mogelijke oplossing de elektrisch „zwevende” versterker genoemd (blz. 69), d.i. een (niet-geaarde) versterker die als geheel de storende fazespanning zo goed mogelijk „volgt”. Vermeld werd dat deze methode in de regel tot gecompliceerde en onhandige constructies leidt en dat een balansversterker met zeer grote katodeweerstand in vrijwel alle gevallen een veel eenvoudiger oplossing biedt.

Dit geldt ten volle indien de te garanderen rejectiefactor een waarde van enige malen 10^4 niet te boven gaat. Moet hij echter van de orde van 10^6 zijn, dan heeft men te doen met een geval waarin een zwevende versterker uitkomst biedt.

De door ons gekozen oplossing bestaat uit de combinatie van twee verschilversterkers in cascade (fig. 3), waarvan de eerste een zwevende versterker is. Deze laat E_{if} als fazespanning vrijwel onveran-

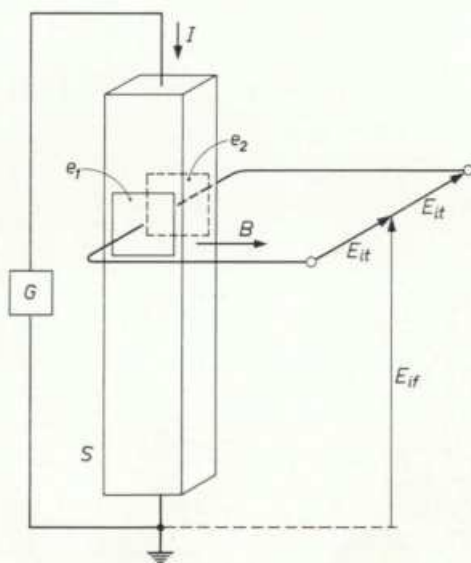


Fig. 2. Meting van het halleffect. Generator G stuurt een stroom I door het proefstaafje S , dat zich bevindt in een magnetisch veld met inductie B loodrecht op de richting van I . Tussen de elektrodes e_1 en e_2 , loodrecht op de vectoren I en B , ontstaat de te meten hallspanning. In overeenstemming met de nomenclatuur van fig. 1 vormt de hallspanning het ingangstege-fazesignaal $2E_{it}$ van de meetversterker, terwijl de spanningsval over het proefstaafje oorzaak is van een ingangsfazespanning E_{if} , die veel groter dan E_{it} is.

derd door ($E_{uf} \approx E_{if}$), maar voor het te meten tegenfasesignaal $2E_{it}$ heeft hij een grote versterking. Aan zijn uitgang is dus de verhouding van tegenfaze- tot fazespanning aanzienlijk gunstiger geworden, en wel zodanig dat de tweede versterker (die wij verder de eindtrap zullen noemen) een normale verschilversterker kan zijn, met een gegarandeerde rejectiefactor in de orde van 100.

Zoals aanstonds zal blijken, is het inderdaad

De totale rejectiefactor van de twee versterkers in cascade is dus:

$$H_{\text{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{H_1 K} + \frac{1}{A_1 H_2}} \quad \dots (2)$$

Hieruit volgt dat zowel $H_1 K$ als $A_1 H_2$ groter dan de gevraagde rejectiefactor H_{min} moet zijn, ook nog wanneer H_1 en H_2 als gevolg van $\pm 10\%$ af-

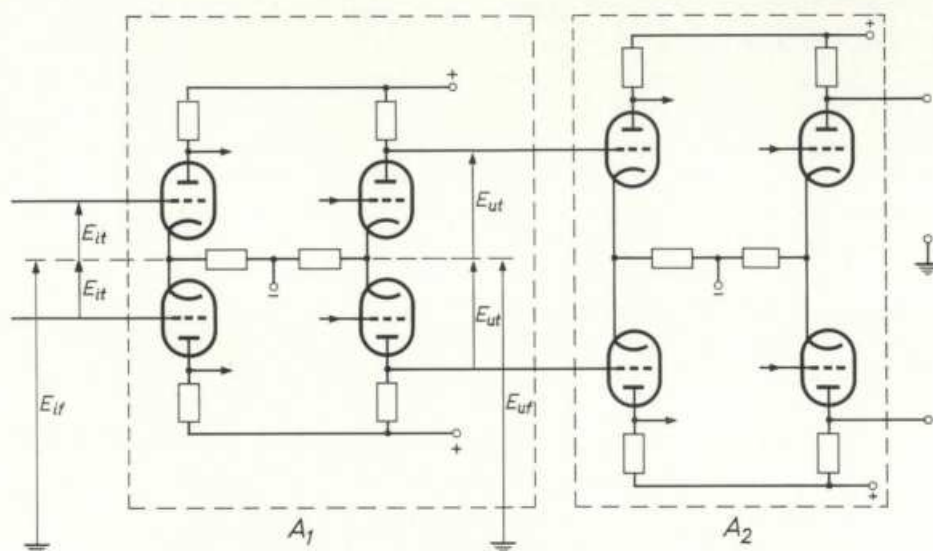


Fig. 3. Cascadeschakeling van een elektrisch „zwevende” verschilversterker A_1 en een gewone verschilversterker A_2 ; van beide zijn alleen de eerste en de laatste trap getekend. A_1 heeft een grote versterking voor het te meten signaal $2E_{it}$ (dus $E_{ut} = A_1 E_{it}$) en „volgt” in zijn geheel de storende fazespanning E_{if} , zodat $E_{uf} \approx E_{if}$. Voor de versterker A_2 kan dan met een matig grote rejectiefactor worden volstaan.

mogelijk, een versterker zo te construeren dat hij de fazespanning tot op een kleine fractie $1/K$ na volgt. Voor zo’n versterker is de fazespanning aan de ingangsklemmen schijnbaar teruggebracht tot E_{if}/K . Noemen wij de versterking voor het tegenfasesignaal A_1 en de rejectiefactor H_1 , dan vinden wij aan zijn uitgang de volgende spanningen:

$$\text{tegenfasesignaal} \quad \dots \quad E_{ut} = A_1 E_{it} + \frac{A_1}{H_1} \frac{E_{if}}{K},$$

$$\text{fazespanning} \quad \dots \quad E_{uf} = \left(1 - \frac{1}{K}\right) E_{if} \approx E_{if}.$$

Duiden wij bij de eindtrap de versterking aan met A_2 en de rejectiefactor met H_2 , dan is het tegenfasesignaal aan de uitgang van deze versterker:

$$A_2 \left(A_1 E_{it} + \frac{A_1}{H_1} \frac{E_{if}}{K} \right) + \frac{A_2}{H_2} E_{if} =$$

$$A_1 A_2 \left[E_{it} + \left(\frac{1}{H_1 K} + \frac{1}{A_1 H_2} \right) E_{if} \right].$$

wijkende parameterwaarden³⁾ hun minimumwaarden hebben:

$$H_1 \min K > H_{\min} \quad \text{en} \quad A_1 H_2 \min > H_{\min} \quad \dots (3)$$

Denken we de eerste versterker te bestaan uit twee trappen en de tweede uit één trap, dan zijn waarden als $H_1 \min = 10^4$ en $H_2 \min = 10^2$ zeer wel te verwezenlijken. Met deze waarden volgt uit de voorwaarden (3), voor het geval dat $H_{\min} = 2 \times 10^6$:

$$K > 200 \quad \text{en} \quad A_1 \geq 2 \times 10^4,$$

d.w.z. de zwevende versterker moet het tegenfasesignaal op zijn minst 20 000-voudig versterken en de fazespanning tot op 0,5% nauwkeurig volgen. Voor de aanstonds te beschrijven versterkers geldt: $A_1 \approx 50\,000$ en H_2 groter dan 500; bijgevolg is $A_1 H_2$ groter dan 25×10^6 . Verder is K inderdaad ongeveer 200, terwijl $H_1 \min$ ongeveer de waarde 2×10^4 heeft. Voor de totale rejectiefactor kan hier dus een waarde van ongeveer vier miljoen gegarandeerd worden, wat voor het gestelde doel ruim voldoende was.

In wat nu volgt zullen wij de verschilversterker bespreken die wij voor het meten van hallspanningen hebben geconstrueerd. In hoofdzaak komen daarbij kwesties aan de orde die verband houden met de zwevende versterker. Aan het eind van het artikel zullen wij in het kort nog ingaan op de moeilijkheden die zich voordoen als de te meten spanning een gelijkspanning is of een frequentie heeft die veel hoger dan 200 Hz is.

De zwevende verschilversterker

De zwevende verschilversterker bestaat uit drie trappen. De eerste en de tweede trap zijn op dezelfde manier geschakeld en versterken samen het signaal ca. 50 000 maal. Ieder van deze trappen bestaat uit twee cascodes in balansschakeling met in de gemeenschappelijke katodeleiding een triode met katodeweerstand. In fig. 4 is het schema van één trap vereenvoudigd weergegeven. Het is in hoofdzaak een combinatie van de schakelingen die afgebeeld zijn in de figuren 6 en 8 van het artikel I. Voor de werking verwijzen wij naar dat artikel. Hier herinneren wij er alleen aan dat elke cascode zich gedraagt als een triode met een zeer grote versterkingsfactor μ , en dat de triode met katodeweerstand zorgt voor de hoge differentiaalweerstand in de katodeleiding. Aan de beide voorwaarden voor een grote rejectie is dus voldaan.

Daar de opeenvolgende trappen capacitief met elkaar zijn gekoppeld, wordt gelijkspanning niet doorgegeven. Bijgevolg merkt men aan de uitgang niet rechtstreeks of de in balans geschakelde cascodes op den duur misschien ongelijke instellingen krijgen. De buizen zouden dus in het niet-lineaire deel van hun karakteristiek kunnen komen te werken; dit zou gepaard gaan met vervorming, d.w.z. een meetfout veroorzaken. Daarom is een maatregel genomen die gelijke (en constante) instelling verzekert. Deze maatregel bestaat hierin dat — in afwijking van fig. 6 van artikel I — de roosters van de „bovenste” cascodebuizen elk op een eigen spanningsdeler zijn aangesloten (fig. 4). Deze spanningsdelers zijn niet met de plusklem van de voeding verbonden, maar met de anode van de desbetreffende buis. Aldus ontstaat een sterke tegenkoppeling voor gelijkspanning, die de cascodes gelijk ingesteld houdt. Ontkoppelcondensatoren tussen de genoemde roosters en de gemeenschappelijke katode zorgen ervoor dat er voor wisselspanning van de signaalfrequentie geen noemenswaardige tegenkoppeling is. Bovendien maken de ontkoppelcondensatoren dat de genoemde roosters de spanning van de gemeenschappelijke katode nauwkeurig volgen, wat voor goede verschilversterkers een vereiste is.

Over de derde trap van de zwevende versterker komen wij aanstonds te spreken. Wij behandelen nu eerst de maatregelen die nodig zijn om deze versterker inderdaad te doen zweven, d.w.z. hem de fazespanning zo goed mogelijk te doen volgen.

De algemene richtlijn hierbij is dat *geen enkel punt van de schakeling een noemenswaardige capaciteit ten opzichte van aarde mag hebben*. Anders immers zou de grote fazespanning van zo'n punt via deze capaciteit een stroom doen lopen die de symmetrie zou verstoren, wat ten koste van de gegarandeerde rejectiefactor zou gaan. Deze eis moet natuurlijk met des te meer klem worden gesteld naarmate het beschouwde punt „gevoeliger” is, d.w.z. naarmate het, elektrisch gesproken, dichter bij de ingangsklemmen en verder uit het midden van de trappen ligt.

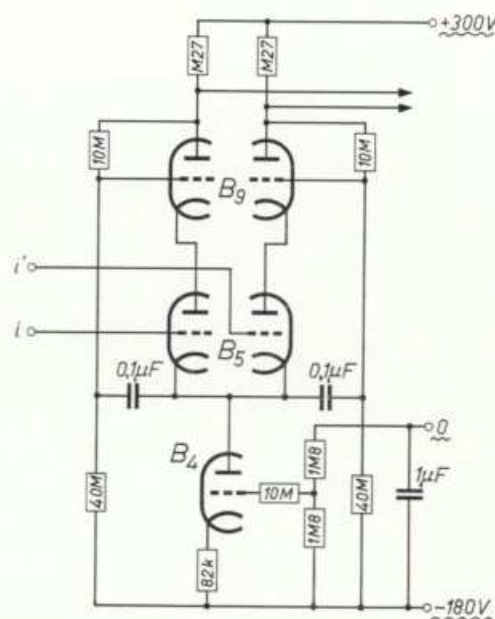


Fig. 4⁴⁾. Vereenvoudigd schema van de eerste trap van de zwevende verschilversterker. De dubbele triodes B_5 en B_9 (UCC 85) vormen een balansschakeling van twee cascodes met grote effectieve versterkingsfactor. In de gemeenschappelijke katodeleiding bevindt zich een triode B_4 ($\frac{1}{2}$ UCC 85) met katodeweerstand; deze combinatie heeft een hoge differentiaalweerstand. Grote versterkingsfactor en hoge (differentiaal)weerstand in de katodeleiding zijn voorwaarden voor grote rejectie.

Spanningsdelers zorgen voor de juiste instelling van de „bovenste” cascodebuizen. Het golflijntje onder +300 V, 0 en -180 V geeft aan dat deze gelijkspanningen zweven, d.w.z. dat er ten opzichte van aarde een wisselspanning (de fazespanning) op gesuperponeerd is.

De eerste maatregel om aan genoemd principe te voldoen, is het plaatsen van de versterker in een gesloten metalen kast (S, fig. 5), die zelf ook de fazespanning ten opzichte van aarde volgt. De kast heeft weliswaar capaciteit (en nog wel een re-

⁴⁾ In fig. 4, 6, 7 en 8 is gebruik gemaakt van een plaatsbesparende notatie van weerstandswaarden. Zo betekent b.v.:

270	270 Ω ,
82 k	82 k Ω ,
10 M	10 M Ω ,
1 k 2	1,2 k Ω ,
M 27	0,27 M Ω .

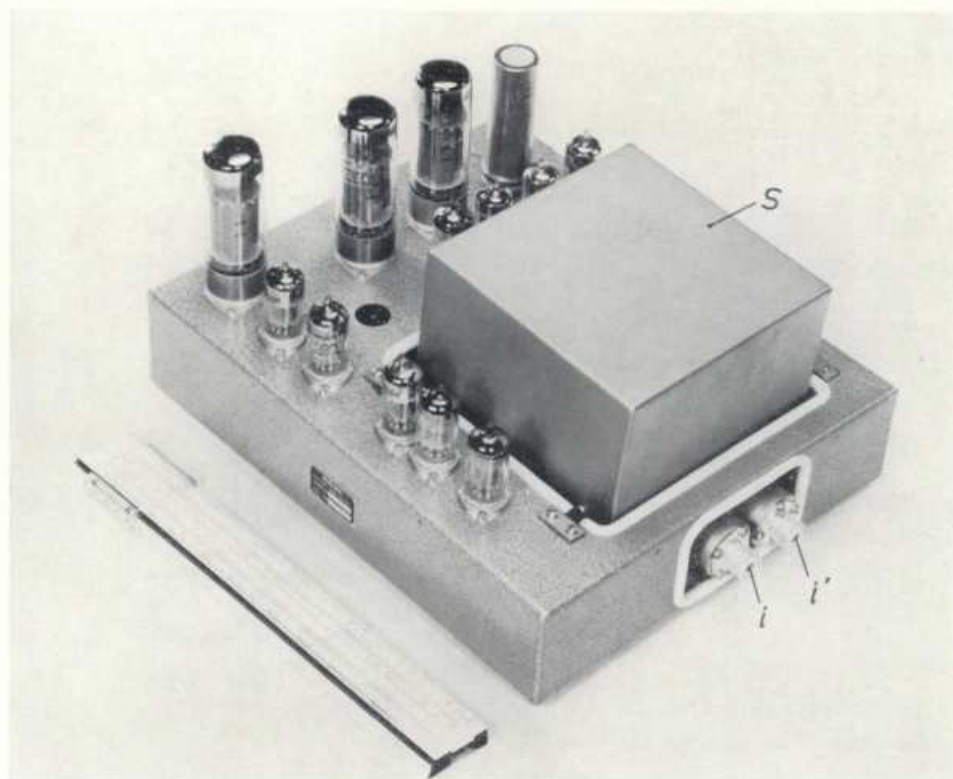


Fig. 5. De verschilversterker met een versterking van ca. 3,5 miljoen en een gegarandeerde rejectiefactor van 4 miljoen. Een zwevende en een geaarde verschilversterker zijn in cascade geschakeld. De zwevende versterker bevindt zich in de metalen afschermkast S en heeft afgeschermd ingangsklemmen $i-i'$. De kast heeft wisselspanning (maximaal ca. 140 V effectief) ten opzichte van het geaarde chassis en is aan elastieken banden geïsoleerd en verend opgehangen.

latief grote) ten opzichte van aarde, maar voor de parasitaire stromen die via deze capaciteit lopen, is een uitweg aangebracht (hulpcascode, zie beneden) die ze buiten de versterker houdt. De kast is opgehangen aan elastieken banden, die voor de elektrische isolatie ten opzichte van het geaarde chassis zorgen en tevens microfonisch effect tegengaan.

De schakeling binnen de kast staat uiteraard langs verschillende wegen in verbinding met de buitenwereld. Dit brengt het gevaar mee dat bepaalde punten van de schakeling toch „aarde kunnen zien”. Deze punten zijn: de ingangsklemmen, de uitgangsklemmen, de punten waarop de voedingsgelijkspanningen worden aangesloten, en de kodes, die capaciteit hebben ten opzichte van de (van buitenaf gevoede) gloeidraden.

Ingangsklemmen. De ingangsklemmen zijn bijzonder gevoelig. Ze zijn daarom zo aangebracht (zie fig. 5) dat hun capaciteit ten opzichte van aarde slechts 0,35 pF bedraagt. Ze worden met het meetobject verbonden door middel van kabels, waarvan de afscherming op de kast is aangesloten. Daardoor wordt de capaciteit van 0,35 pF vermeerderd met

0,6 pF per meter lengte van de kabels. Met 1 m kabel, wat meestal lang genoeg zal zijn, blijft de ingangscapaciteit dus nog beneden 1 pF.

Uitgangsklemmen. Werd op de tweede trap direct de (niet-zwevende) eindtrap aangesloten, dan zou de rejectie van de zwevende versterker bedorven worden door de vrij aanzienlijke parasitaire capaciteit van de verbindingen tussen de twee versterkers. Ook zouden door inductie storende spanningen in deze verbindingen kunnen worden opgewekt. Beide schadelijke effecten zijn kleiner naarmate de uitgangsweerstanden in de laatste trap van de zwevende versterker lager zijn. Daarom is deze versterker voorzien van een balans-katodevolger als (niet-versterkende) derde trap met relatief lage uitgangsweerstanden ($\approx 1/S$, waarin S de steilheid van de buizen is).

Voedingsgelijkspanningen. De zwevende versterker heeft ten opzichte van de katodes van B_1 (fig. 4) twee voedingsgelijkspanningen nodig: +300 V en -180 V. De bronnen van deze spanningen moeten de fazespanning E_{if} volgen. Een eenvoudige en afdoende, maar niet bepaald praktische oplossing zou zijn, de spanningen te laten leveren

door in de kast geplaatste batterijen. In beginsel zou men ze ook kunnen betrekken uit twee zwevende voedingsapparaten, maar aan de afscherming tussen de primaire en de overige wikkelingen van de voedingstransformator zouden dan bijzonder zware eisen gesteld moeten worden. Hieronder zullen wij laten zien hoe deze moeilijkheid is vermeden door het gebruik van geaarde voedingsapparaten in combinatie met enige hulpbuizen.

Katodes. Het effect van de katode-gloeidraadcapaciteiten doet zich niet meer voor als voorkomen wordt dat er tussen de katodes en de gloeidraden wisselspanning komt te staan. Er is een schakeling voor zwevende voeding van de gloeidraden uitgewerkt die zeer goed aan deze voorwaarde voldoet. Ze is overzichtelijker dan de schakeling die de zwevende spanningen van +300 V en -180 V levert, en wordt daarom het eerst besproken.

Zwevende voeding van de gloeidraden

De in fig. 6 afgebeelde schakeling maakt de katode-gloeidraadcapaciteiten onschadelijk door ervoor te zorgen dat de gloeidraden van de betrokken buizen dezelfde wisselspanning (E_{if}) ten opzichte van aarde krijgen als de katodes. Al deze buizen zijn dubbele triodes van het type UCC 85, dat een gloeistroom van 100 mA nodig heeft. Deze stroom is hier gelijkstroom. Dit is in de eerste plaats nodig omdat storing door „brom“, die bij indirect verhitte katodes met wisselstroom als gloeistroom nog in zekere mate ontstaat, dan geheel afwezig is. In de tweede plaats is men hier op gelijkstroom aangewezen omdat voor de zwevende voeding dan gebruik kan worden gemaakt van de eigenschap van pentodes dat in het normale werkgebied hun differentiaalweerstand veel hoger is dan hun gelijkstroomweerstand.

De betrokken gloeidraden zijn in serie geschakeld en worden gevoed uit twee plaatsspanningsapparaten, waarvan het ene +550 V en het andere -525 V ten opzichte van aarde levert. In serie met de reeks gloeidraden staat aan het ene eind een pentode B_{15} (fig. 6), die als stroombron fungeert en ingesteld is op een anodestroom van 100 mA. Aan het andere eind bevindt zich een pentode B_{16} , die als katodevolger werkt. Het stuurrooster van B_{16} is verbonden met een punt x elders in de schakeling (zie fig. 8) dat niet alleen de gelijkspanning heeft die de buis de goede instelling geeft, maar waarop bovendien ten opzichte van aarde de wisselspanning E_{if} staat. Dit laatste heeft tot gevolg dat de gehele keten vanaf de katode van B_{16} tot de anode van B_{15} vrijwel deze zelfde wisselspanning aanneemt: dank zij de hoge differentiaalweerstand van B_{15}

en de grote versterkingsfactor μ van B_{16} werkt B_{16} als katodevolger waarvan de katode de roosterspanning zeer dicht volgt en dus vrijwel de wisselspanning E_{if} ten opzichte van aarde krijgt, en de hoge differentiaalweerstand van B_{15} heeft bovendien tot gevolg dat de wisselstroomcomponent in de keten tot een zeer kleine waarde beperkt blijft, zodat alle punten van de keten nagenoeg dezelfde wisselspanning ten opzichte van aarde vertonen. Deze wisselspanning is die welke aan de katode van B_{16} wordt opgelegd, dus E_{if} . Daar de katodes van de buizen in de zwevende versterker eveneens E_{if} volgen, worden de katode-gloeidraadcapaciteiten onwerkzaam.

De gelijkspanning waarmee de keten gevoed wordt, bedraagt $550 + 525 = 1075$ V, welke waarde, mede door de grote amplitude van E_{if} , nodig is voor de versterkers. Om te voorkomen dat daarbij de toelaatbare dissipatie van de buis B_{16} zou worden overschreden, is er een tweede buis (de als triode geschakelde pentode B_{17}) mee in serie geschakeld,

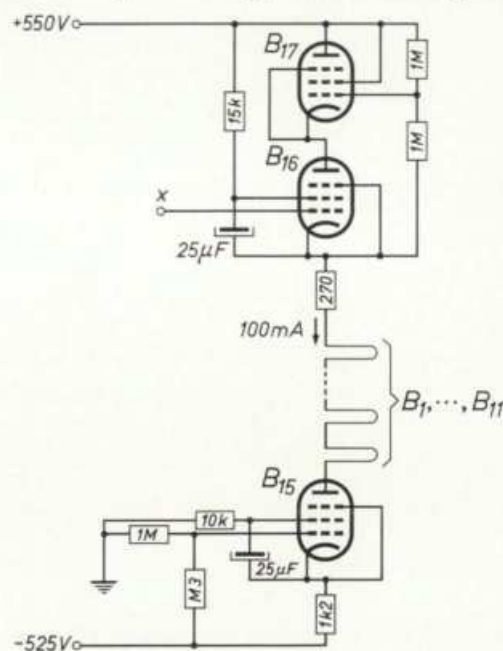


Fig. 6 4). Schakeling voor het in serie voeden van de gloeidraden van elf buizen UCC 85 ($B_1, \dots, B_{11}$) met gelijkstroom (100 mA) en voor het onschadelijk maken van de katode-gloeidraadcapaciteiten.

Pentode B_{15} met katodeweerstand fungeert als stroombron en is ingesteld op een anodestroom van 100 mA. Pentode B_{16} werkt als katodevolger dank zij zijn grote versterkingsfactor en de hoge differentiaalweerstand van B_{15} . De katode van B_{16} volgt dus de spanning van het stuurrooster; dit is verbonden met een geschikt punt x elders in de schakeling (zie fig. 8), dat ten opzichte van aarde de wisselspanning E_{if} heeft. De hoge differentiaalweerstand van B_{15} verhindert dat in de keten een noemenswaardige wisselstroom loopt; alle elf gloeidraden krijgen dus nagenoeg dezelfde wisselspanning E_{if} . Daar deze ook op de katodes van de buizen in de versterker staat, lopen er geen parasitaire stromen tussen de gloeidraden en de katodes.

Buis B_{17} is nodig omdat zonder deze buis de dissipatie van B_{16} ontoelaatbaar groot zou worden. B_{15} , B_{16} en B_{17} zijn eindpentodes type EL 34.

die een deel van de spanning opneemt. De buizen B_{15} , B_{16} en B_{17} zijn eindpentodes van het type EL 34.

De buizen UCC 85 waarvan de gloeidraden op deze wijze in serie worden gevoed, zijn elf in getal. Zeven hiervan behoren tot de zwevende versterker en twee tot de eindtrap; de andere twee zijn hulp-buizen, die straks ter sprake komen. De overige in de versterker voorkomende buizen zijn E-buizen, waarvan de gloeidraden worden gevoed met wisselstroom.

Zwevende voedingsgelijkspanningen

In *fig. 7* zijn van de eerste trap van de zwevende versterker alleen de „onderste” triodes (B_0) getekend. De rest van het schema stelt vereenvoudigd de schakeling voor die nodig is om het gebruik van geaarde voedingsapparaten mogelijk te maken, waarbij zich geen moeilijkheden met afscherming voordoen. Het betreft hier dezelfde voedingsapparaten als die waaruit de gloeistroom wordt betrokken: +540 V (10 V lager dan het punt vanwaar de gloeistroom wordt afgenomen, door extra-afvlakking) en -525 V ten opzichte van aarde; de laatstgenoemde spanning is zeer goed gestabiliseerd.

Wij laten nu eerst zien, hoe met de schakeling van fig. 7 de juiste gelijkspanningen worden verkregen, en vervolgens, hoe ervoor is gezorgd dat de gehele zwevende versterker de fazespanning volgt.

De zwevende versterker heeft, zoals gezegd, $+300$ V en -180 V ten opzichte van de katodes van B_5 nodig, die geen gelijkspanning, maar wel de fazespanning E_{if} ten opzichte van aarde vertonen. Op het eerste gezicht lijkt het voor de hand te liggen, dat punt (de katodes van B_5) met de afschermkast te verbinden. Als men dit deed, zouden echter de capacatieve stromen die via de kast lopen, niet buiten de versterker blijven. Daarom is tussen de punten $+300$ V en -180 V een hulpcaascode aangebracht (B_3a - B_3b); het „midden” hiervan (punt 0) kan zonder bezwaar met de kast worden verbonden. Aangezien B_3a een zeer nauwkeurige katodevolger is (in zijn katodeleiding bevinden zich de zeer hoge differentiaalweerstand van de triodes B_3b en B_{12b} , zie fig. 7), heeft het punt 0 vrijwel dezelfde spanning als de katodes van B_5 .

Dat het punt -180 V inderdaad deze gelijkspanning heeft, wordt verzekerd door de spanningsdeler $3,6 + 4,7 + 1,8 \text{ M}\Omega$ tussen de punten 0 en -525 V. Ook B_3b is namelijk een goede katodevolger, zodat zijn katode vrijwel dezelfde spanning heeft als zijn rooster, dat op de genoemde spanningsdeler is aangesloten.

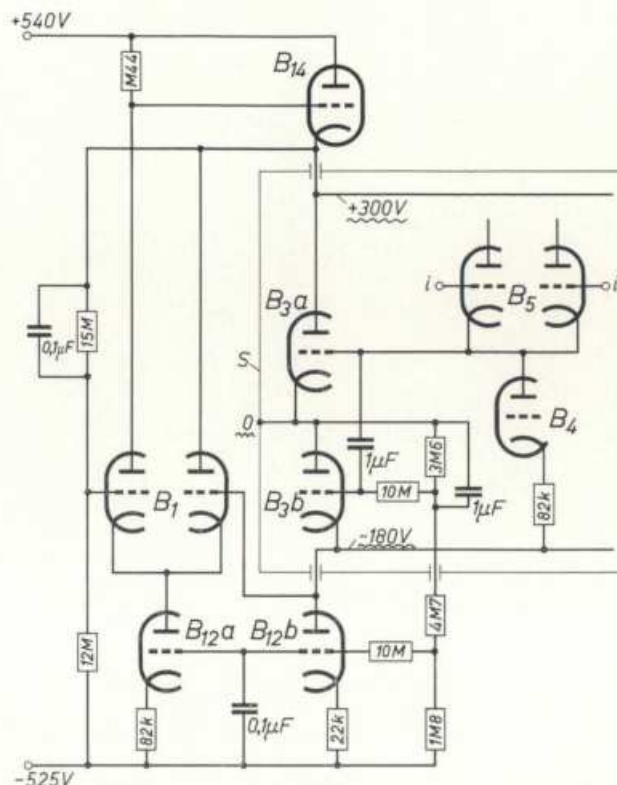


Fig. 7⁴). Schakeling voor het leveren van de zwevende voedingsspanningen $+300$ V en -180 V aan de zwevende verschilversterker. Buis B_2 behoort tot de eerste trap van deze versterker (vgl. fig. 4). $i-i'$ ingangsklemmen. B_3a - B_3b hulpcaiode, met stroombron B_1b in de katodeleiding. Daar B_3a een katodevolger is, krijgt zijn katode (punt 0, verbonden met de kast S) nagenoeg dezelfde gelijkspanning (≈ 0) en wisselspanning (E_{if}) als de katodes van B_2 . De spanningsdeler $3,6 + 4,7 + 1,8$ M Ω geeft een gelijkspanning van -180 V aan het rooster van B_3b , dat via een condensator van 1 μ F tevens de wisselspanning E_{if} krijgt. Daar B_3b eveneens een katodevolger is, komen deze beide spanningen ook op de katode van B_3b (punt -180 V) te staan.

De seriëtriode B_{14} , bestuurd door de hulpverschilversterker B_1 - B_{12a} , zorgt ervoor dat het punt $+300$ V zowel de juiste gelijkspanning (bepaald door de spanningsdeler $15 + 12$ M Ω) als de wisselspanning E_{if} krijgt.

Aan het punt $+300$ V wordt de juiste gelijkspanning verkregen volgens het bekende systeem van het „regel-p.s.a.“: de voeding vanaf het punt $+540$ V geschiedt over een serietriode (B_{14}), die via een hulpversterker wordt bestuurd, waarbij de zoëven afgeleide gelijkspanning van -180 V als referentiespanning dient. Deze hulpversterker is een verschilversterker, bestaande uit de balansschakeling van de dubbele triode B_1 met in de katodeleiding de triode B_{12a} . Het ene rooster van B_1 is verbonden met het punt -180 V, het andere rooster met de aftakking op een spanningsdeler ($12 + 15$ M Ω) tussen de punten $+300$ V en -525 V. De verhouding van de spanningsdeler is zo gekozen dat, wanneer het punt $+300$ V de juiste spanning heeft, de twee roosters van B_1 dezelfde spanning hebben. Wordt de spanning aan het punt $+300$ V b.v. hoger,

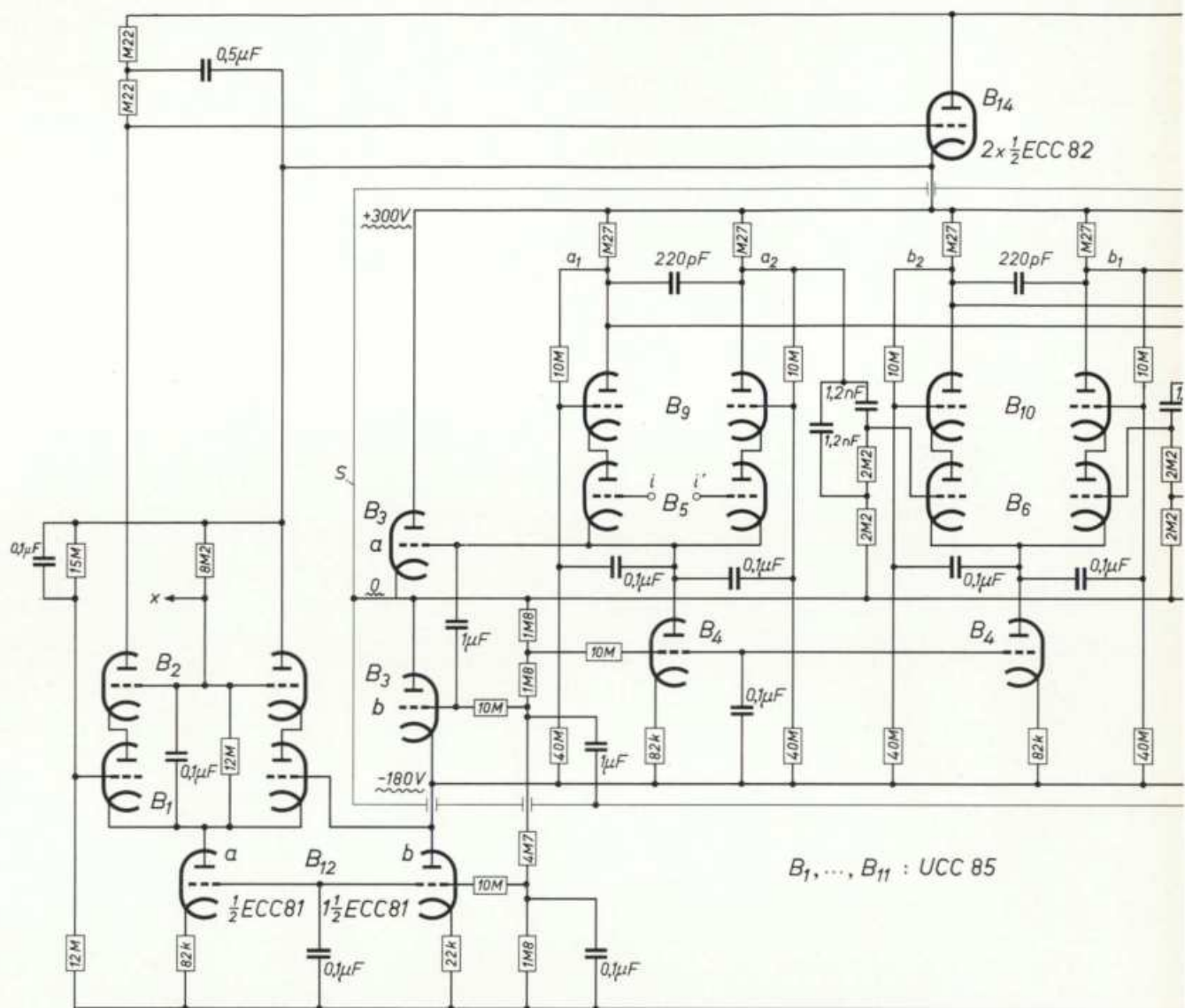
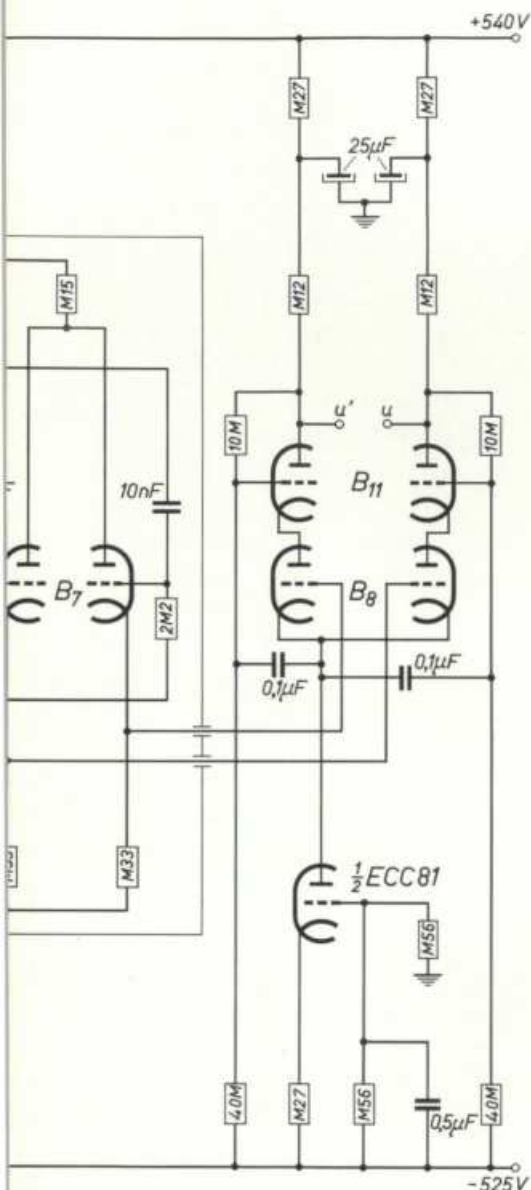


Fig. 8⁴). Volledige schakeling (uitgezonderd de serievoeding van de gloeidraden) van de in fig. 5 afgebeelde verschilversterker. De buizen zijn op dezelfde wijze genummerd ($B_1 \dots B_{14}$) als in de vorige figuren. $i-i'$ ingang, $u-u'$ uitgang, S afschermkast van de zwevende versterker. Op punt x is het stuurrooster van buis B_{16} aangesloten (fig. 6).

dan neemt in de linkerhelft van B_1 de anodestroom toe, de anodespanning (dus de rooster-spanning van B_{14}) derhalve af, en daar ook B_{14} een katodevolger is, daalt de katodespanning van B_{14} — d.i. de spanning van het punt $+300$ V — eveneens. De spanning aan dit punt wordt dus automatisch constant gehouden.

Nu is nog slechts een kleine stap nodig om in te zien dat de punten 0, -180 V en $+300$ V nauwkeurig de fazespanning E_{if} volgen. Deze is aanwezig aan de katodes van B_s , dus ook aan het rooster van B_{3a} en, via een condensator van $1 \mu\text{F}$, aan het rooster van B_{3b} . (Een weerstand van $10 \text{ M}\Omega$ tussen

het rooster van B_3b en de aftakking op de spanningsdeler van $3,6 + 4,7 + 1,8 \text{ M}\Omega$ voorkomt ongewenste belasting van de spanningsdeler via de genoemde condensator.) Wegens de katodevolger-eigenschappen van B_3a en B_3b zullen dus ook hun katodes de fazespanning volgen, en deze katodes zijn verbonden met punt 0 resp. punt -180 V . De referentiespanning aan het rooster van B_3b is derhalve de som van een gelijk- en een wisselspanning. Dit heeft tot gevolg dat de katode van B_{14} (het punt $+300 \text{ V}$) ten opzichte van aarde niet alleen de juiste gelijkspanning krijgt, maar bovendien de juiste wisselspanning (de fazespanning E_{if}).



Verdere bijzonderheden

De eindtrap

Zoals bij fig. 3 al is uiteengezet, volgt op de zweepende verschilversterker (A_1) een niet-zweepende verschilversterker (A_2) als eindtrap. Het schema van A_2 vindt men rechts in fig. 8. Ook hier wordt een balansschakeling van twee cascodes gebruikt (B_8 - B_{11} , beide UCC 85), met in de katodeleiding een stroombron, bestaande uit een triode B_{13} (één helft van een ECC 81) met katodeweerstand. De schakeling is berekend op de grote amplitude (ca. 200 V) die E_{if} kan aannemen, wat o.a. de hoge voedingsspanningen nodig maakt. Aan de uitgang verschijnt het versterkte ingangssignaal op een zodanig niveau en zodanig van fazespanning bevrijd dat het verder door conventionele middelen kan worden verwerkt.

Stapsgewijze regeling van de versterking met behulp van fotoweerstanden

De volle versterking van enige malen 10^6 is niet altijd nodig. Dikwijls kan men volstaan met een 10 of 100 maal zo kleine versterking, mits de rejectiefactor niet in sterkere mate wordt verkleind.

Een geschikt middel om de versterking aldus te verkleinen, is het aanbrengen van een weerstand tussen a_1 en a_2 of tussen b_1 en b_2 (fig. 8)⁵⁾: voor een 10 maal zo kleine versterking een weerstand van 47 k Ω tussen a_1 en a_2 , en voor een 100 maal zo kleine versterking een weerstand van 4,7 k Ω tussen b_1 en b_2 .

Voor het in- en uitschakelen van deze weerstanden is gebruik gemaakt van fotoweerstanden⁶⁾. Deze zijn vrij van de bezwaren die verbonden zijn met het gebruik van gewone schakelaars of relais in een kast die elektrisch en mechanisch „zweeft”.

Het gekozen type fotoweerstand heeft in het donker een weerstand van meer dan 100 M Ω en bij belichting door een gloeilampje een weerstand van nog slechts ca. 150 ohm. Fotoweerstanden van dit type kunnen dus als schakelaar dienen voor weerstanden die veel hoger dan 100 ohm en tevens veel lager dan 100 M Ω zijn. Aan deze voorwaarde voldoen de weerstanden van 4,7 en 47 k Ω die hier nodig zijn. De (geaarde) belichtingslampjes zijn zo geplaatst dat ze de capaciteit ten opzichte van aarde van de onderdelen binnen de kast niet merkbaar vergroten (fig. 9).

Resultaten

De totale versterking van het tegenfasesignaal bedraagt ca. $3,5 \times 10^6$. Ondanks deze zeer grote

⁵⁾ Voor methodes tot regeling van de versterking, zie het in ²⁾ aangehaalde artikel II, blz. 121 e.v.

⁶⁾ N. A. de Gier, W. van Gool en J. G. van Santen, Fotoweerstanden van geperst en gesinterd cadmiumsulfide, Philips techn. T. 20, 285-295, 1958.

Het volledige schema van de versterker (echter zonder de geaarde voedingsapparaten en de gloeistroomvoeding) vindt men in fig. 8. De dunne lijn stelt de afschermkast voor. De buizen zijn op dezelfde wijze genummerd als in de vorige figuren. Zoals men ziet, bestaat de versterker die de buis B_{14} bestuurt, in werkelijkheid uit de balansschakeling van twee cascodes; deze levert een grotere versterking dan de in fig. 7 getekende balansschakeling van twee triodes. In fig. 8 is het punt x aangegeven waarop het stuurrooster van B_{16} (fig. 6) is aangesloten.

Uit metingen van de boven ingevoerde factor $1/K$ bij 150 Hz is gebleken dat het punt +300 V de fazespanning tot op 0,53 % volgt, en de punten 0 en -180 V tot op 0,36 %.

